

**Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики
(Новгородский филиал)**

На правах рукописи
УДК 004.932

Жуковская Инга Анатольевна

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЕЩЕСТВ
РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ**

Специальность 01.04.01– «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
профессор
Ткаль Валерий Алексеевич

Ижевск
2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ РАЗЛИЧНОГО ТИПА В МОНОКРИСТАЛЛАХ.....	16
1.1. Формирование экспериментального контраста в рентгеновской топографии.....	16
1.1.1. Секционный и проекционный методы Ланга	17
1.1.2. Рентгеновская топография на основе эффекта Бормана	18
1.1.3. Метод Берга–Баретта–Ньюкирка.....	22
1.2. Формирование экспериментального контраста в методе фотоупругости (поляризационно–оптический анализ).....	22
1.3. Рентгеновская топо–томография кристаллов	25
1.4. Расшифровка экспериментального контраста и идентификация дефектов структуры	28
1.4.1. Основные приемы расшифровки экспериментального контраста и идентификация дефектов структуры.....	28
1.4.2. Теоретическое моделирование контраста дефектов структуры монокристаллов.....	30
1.5. Основные факторы, затрудняющие расшифровку экспериментального контраста и идентификацию дефектов структуры....	34
1.6. Методы цифровой обработки экспериментального контраста	37
1.7. Цифровая обработка, основанная на анализе яркостных характеристик экспериментального контраста	39
1.7.1. Устранение слабого контраста	39
1.7.2. Методы устранения неравномерного фона.....	40
1.7.3. Методы устранения зернистости изображений дефектов	45
1.7.4. Способы представления изображения в виде, удобном для визуального анализа и измерения.....	50

1.8. Методы основанные на частотном анализе экспериментального контраста	52
1.9. Дискретный вейвлет–анализ двумерных сигналов	54
1.10. Устранение фоновой неоднородности	64
1.11. Устранение зернистости экспериментального контраста.....	71
1.12. Выводы и постановка основных задач диссертационного исследования.....	76
ГЛАВА 2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТОПОГРАФИЧЕСКИХ И ПОЛЯРИЗАЦИОННО–ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ	80
2.1. Моделирование основных зашумляющих факторов топографического и поляризации–оптического контрастов.....	80
2.2. Основные проблемы, решаемые введением количественных критериев.....	85
2.3. Количественные методики оценки качества изображений	86
2.3.1. Классификация методик оценки качества	86
2.2.2. Среднеквадратичное отклонение (<i>MSE</i>).....	87
2.2.3. Пиковое отношение сигнала к шуму (<i>PSNR</i>).....	88
2.3.4. Показатель структурного сходства <i>SSIM</i>	89
2.4. Применение метрик <i>MSE</i> , <i>PSNR</i> и <i>SSIM</i> для оценки качества восстановления зашумленного изображения.....	91
2.5. Количественная оценка эффективности цифровой обработки изображений по их яркостным характеристикам	96
2.6. Количественная оценка эффективности различных методов цифровой обработки	105
2.7. Количественная оценка эффективности цифровой обработки HDR-изображений	109
2.8. Выводы	111

ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ВЕЩЕСТВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ..	113
3.1. Основные диагностические методы.....	113
3.2. Компьютерная диагностика качества мясного сырья	117
3.3. Компьютерная диагностика качества мясной продукции	122
3.4. Компьютерная диагностика сухого и мокрого способов посола мяса	130
3.4.1. <i>Модель процесса посола и методики его исследования.....</i>	<i>131</i>
3.4.2. <i>Экспериментальное исследование процесса посола.....</i>	<i>135</i>
3.5. Компьютерная диагностика качества пива	144
3.6. Компьютерная диагностика качества питьевой и промышленной воды	152
3.7. Компьютерная диагностика винной продукции	164
3.7.1. <i>Влияние галлизации на цветность вина.....</i>	<i>166</i>
3.7.2. <i>Влияние избыточного сульфита на цветность и сохранность окраски вина.....</i>	<i>169</i>
3.8. Выводы	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	185

ВВЕДЕНИЕ

Вступление России во Всемирную торговую организацию неизбежно влечет за собой обострение конкурентной борьбы между отечественными и зарубежными производителями, как на внутреннем, так и внешнем рынках. Конкуренцию смогут успешно выдержать только производители современной и высококачественной продукции, а это возможно при внедрении новых технологий и материалов, выпуске товаров и продукции мирового уровня, максимально удовлетворяющих потребности различных отраслей экономики и спрос населения. Эффективное решение этих задач невозможно без разработки и внедрения современных высокочувствительных и универсальных методов экспресс-диагностики и контроля качества, включая применение объективных количественных критериев оценки качества анализируемых объектов, снижающих субъективный фактор и доступных для широкого круга специалистов и предприятий. При этом интерес представляют методы, применимые для исследования и диагностики объектов различной физико-химической природы.

Достижения современной микро- и нанoeлектроники связаны с применением совершенных монокристаллических материалов, тонких пленок, внедрением новых технологий, а также с использованием для исследования материалов и оценки их качества разнообразных методов. Надежное выявление дефектов кристаллической структуры позволяет выпускать изделия микро- и нанoeлектроники высокого качества. Наличие в активной области приборов и микросхем или вблизи её даже одного дефекта приводит к нестабильности и деградации параметров и характеристик, к снижению надежности как самих приборов и микросхем, так и изделий на их основе. В связи с этим важной задачей остается повышение чувствительности и разрешения старых, а также разработка новых экспрессных методов регистрации и идентификации дефектов структуры кристаллической решетки всех типов. К таким методам относятся методы рентгеновской топо-

графии и поляризационно-оптический анализ (метод фотоупругости).

Факторами, затрудняющими расшифровку экспериментального контраста, формируемого дефектами структуры, являются слабая контрастность, фоновая неоднородность и зернистость фотоэмульсии, устранение которых относится к важнейшим проблемам диагностики качества материалов, позволяющим повысить надежность выявления и однозначность идентификации дефектов структуры различного типа. Для устранения зашумляющих факторов применяются различные приемы и методы, но наиболее перспективными являются методы, основанные на цифровой обработке экспериментального контраста. Применение этих методов влечет повышение качества контраста, минимизацию субъективного фактора, обусловленного визуальным контролем топограмм и фотоснимков, и возможность введения объективных количественных критериев оценки. При таком подходе достигается надежная расшифровка экспериментального контраста, однозначная идентификация дефектов структуры, выбор наиболее оптимального диагностического метода и метода цифровой обработки.

Помимо электроники, интерес к использованию компьютерных технологий наблюдается и в других отраслях народного хозяйства, в частности, в пищевой промышленности.

Большое количество диагностических методов, используемых в пищевой промышленности, требуют, как правило, дорогостоящих оборудования и химических реактивов, высокой квалификации специалистов и значительных временных затрат. В основе ряда методов лежит визуальный контроль качества сырья и готовой продукции. Человеческий глаз, обладая уникальными возможностями, в ряде случаев уступает техническим средствам при регистрации изменений цветовых характеристик исследуемых объектов в процессе их производства, хранения, транспортировки и воздействия других внешних факторов. Цвет относится к важнейшим характеристикам и напрямую может быть связан с качеством продукции и с изменениями, происходящими в ней. При исследовании любых объектов

важным является разработка эффективных методов цифровой экспресс-диагностики, основанных на регистрации даже незначительных изменений их цветовых характеристик, и введение надежных количественных критериев оценки качества продукции.

С учетом вышеизложенного, можно сформулировать основные требования, которым должны удовлетворять разрабатываемые цифровые методы исследования веществ различной физико-химической природы:

- простота реализации и измерений;
- надежность и объективность;
- высокая чувствительность и разрешение;
- экспрессность;
- доступность для широкого круга исследователей и производителей продукции.

Выпуск большого количества разнообразной и высококачественной оргтехники (компьютеров, сканеров, принтеров, ксероксов, цифровых аппаратов и камер), совершенствование её интерфейса, разработка и внедрение в научно-исследовательский и производственный процесс новых методик и программ по обработке и анализу изображений делают доступным контроль качества, основанный на цифровой обработке экспериментальных сигналов и изображений.

Цели работы:

- разработка и дальнейшее совершенствование методов цифровой обработки экспериментального контраста (изображения), формируемого объектами различной физико-химической природы;
- повышение экспрессности и введение объективных количественных критериев оценки качества исследуемых объектов и изменений, происходящих в них при воздействии различных внешних факторов, основанных на регистрации цветовых характеристик;
- исследование и визуализация процесса посола мяса и определение

его количественных параметров и характеристик цифровыми методами.

Объекты исследования:

- теоретические и экспериментальные изображения дефектов монокристаллов с зашумляющими факторами, полученные поляризационно-оптическим анализом и рентгеновской топографией на основе эффекта Бормана (метод РТБ);
- мясное сырье разных отечественных и зарубежных производителей (говядина и свинина);
- мясная продукция разных производителей (колбасные изделия);
- мясо цыпленка-бройлера, подвергнутое различным способам посола многокомпонентной смесью (соль-перец-чеснок);
- речная и питьевая вода;
- пиво и вино разных производителей.

Решаемые проблемы и исследуемые процессы:

- выявление и идентификация в монокристаллах на фоне зашумляющих факторов дефектов структуры различного типа;
- повышение экспрессности цифровой обработки экспериментального контраста на основе дискретного вейвлет-анализа (частотный анализ изображений);
- поиск простых, надежных количественных критериев анализа экспериментального контраста, уменьшающих субъективность его расшифровки и идентификации дефектов структуры, а также выбора оптимального метода цифровой обработки и вейвлет-базиса;
- оценка влияния различных внешних факторов на качество пищевой продукции (условия хранения, заморозка и разморозка, температура и т.д.);
- визуализация процесса посола мяса многокомпонентной смесью и определение его количественных параметров и характеристик (глубины и скорости проникновения смеси и ее компонентов);

- оценка эффективности очистки питьевой воды;
- регистрация процесса старения пива и частиц различной физико-химической природы, содержащихся в нем, без применения специальных красителей;
- выявление фальсифицированной винной продукции.

Методы исследования:

- поляризационно-оптический анализ (метод фотоупругости);
- рентгеновская топография на основе эффекта Бормана (метод РТБ);
- методы цифровой обработки экспериментального контраста, основанные на анализе яркостных и частотных (дискретный вейвлет-анализ) характеристик;
- гостированные методики оценки качества сырья и готовой продукции, применяемые на предприятиях пищевой промышленности и водоочистительных станциях.

Научная новизна работы.

1. Для зашумленного теоретического контраста монокристаллического 6H-SiC, реставрированного цифровой обработкой вейвлетами Мейера (Dmey) и Симлета с масштабом функции 8(Sym8), проведена сравнительная оценка качества устранения шума с использованием метрик PSNR (отношение сигнала к шуму), MSE (среднеквадратичное отклонение), SSIM (показатель структурного сходства) и яркостных характеристик.
2. Для различных типов дефектов структуры (краевой и правовинтовой дислокаций, когерентных включений типа «вакансия» и «внедрение») проведена количественная оценка качества цифровой обработки теоретического и экспериментального контраста монокристалла 6H-SiC (незашумленного и зашумленного) вейвлетами Sym8 и Dmey, основанная на анализе яркостных характеристик, профилей интенсивности и разностного контраста.

3. На примере поляризационно-оптического контраста монокристалла 6H-SiC проведена количественная оценка эффективности различных методик цифровой обработки при устранении фоновой неоднородности. Показано, что методика, основанная на выделении при дискретном вейвлет-анализе контраста, формируемого фоновой неоднородностью и ее вычитании из исходного контраста с последующим гаусс-размытием, построением разностного контраста и коррекцией динамического диапазона, уменьшает время обработки в 10–12 раз.

4. Показана возможность организации количественной и качественной экспресс-диагностики сырья и готовой пищевой продукции (мясо, колбасные изделия, вода, пиво, вино), основанной на регистрации изменений цвета: разностному контрасту, областям равного контраста, профилям интенсивности и яркостным характеристикам.

5. Показана возможность визуализации цифровыми методами процесса посола мяса цыпленка-бройлера смесью соль-перец-чеснок, определения глубины и скорости проникновения посолочной смеси её компонент в мясо по цветовым характеристикам (разностному контрасту, областям равного контраста, профилям интенсивности и яркостным характеристикам), а также при разложении оцифрованного изображения по цветовым каналам.

Практическая значимость.

1. На основе дискретного вейвлет-анализа разработана экспресс-методика устранения явления элайзинга и фоновой неоднородности экспериментального контраста вычитанием из исходного контраста фоновой неоднородности с последующим гаусс-размытием, построением разностного контраста и коррекцией динамического диапазона.

2. Предложена методика количественной оценки качества цифровой обработки, эффективности диагностических методов и выбранных вейвлет-базисов, основанная на построении разностного контраста (нуле-

вого и ненулевого) и яркостных характеристик, обладающая по сравнению с метриками PSNR, MSE и SSIM большей простотой и экспрессностью.

3. Разработаны и апробированы в условиях производства цифровые экспресс-методики контроля качества мясного сырья, мясной продукции и влияния различных внешних факторов, основанные на регистрации изменений цветовых характеристик.

4. Разработаны четыре цифровые экспресс-методики визуализации процесса посола мяса цыпленка-бройлера смесью соль-перец-чеснок и определения по изменению цветовых характеристик количественных характеристик процесса (глубины и скорости проникновения смеси и ее компонент), совпадающие с предложенными теоретическими моделями.

5. Показана возможность выявления в пиве без применения специальных красителей частиц различной физико-химической природы, а также возможность исследования процесса старения и стабилизации пива, основанная на регистрации изменений цвета (построении разностного контраста, яркостных характеристик и профилей интенсивности).

6. Разработана и апробирована на водоочистительной станции цифровая экспресс-методика диагностики качества речной и питьевой воды, основанная на регистрации изменений цветовых характеристик.

7. Разработана цифровая экспресс-методика выявления фальсифицированной винной продукции, основанная на сравнении исследуемой продукции с эталонными образцами и регистрации изменений цветовых характеристик.

8. Цифровые методики позволили зарегистрировать не только качественные изменения цветовых характеристик исследуемого вещества, но и дать количественную оценку этих изменений, снизить субъективность визуального контроля.

Методики могут быть применены на предприятиях пищевой промышленности и в организациях, контролирующих качество пищевых продуктов, их производство, хранение и реализацию через торговую сеть,

например, торговой инспекцией и Роспотребнадзором.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Уменьшение 10–12 раз времени обработки экспериментального контраста, содержащего дефекты структуры и сильную фоновую неоднородность, устранение элайзинга достигается применением дискретного вейвлет-анализа и методики, основанной на выделении из исследуемого изображения фоновой неоднородности с последующим ее вычитанием из исходного изображения, гаусс-размытием, построением разностного контраста и коррекцией динамического диапазона.

2. Уменьшение субъективного фактора, связанного с визуальным контролем экспериментального контраста и идентификацией дефектов структуры, с оценкой эффективности различных диагностических методов, выбора оптимального вейвлет-базиса и с регистрацией изменений цветовых характеристик объектов различной физико-химической природы, достигается применением количественных критериев – яркостных характеристик, разностного контраста (нулевого и не нулевого), областей равного контраста и профилей интенсивности.

3. Визуализация процесса посола мяса и определение его количественных характеристик (глубины и скорости проникновения смеси и её компонент) достигается построением яркостных характеристик, разностного контраста (нулевого и не нулевого), областей равного контраста, профилей интенсивности и разложением оцифрованного изображения по цветовым каналам.

Обоснованность и достоверность теоретических и экспериментальных исследований доказывается широкой апробацией основных результатов работы на конференциях и семинарах различного ранга, включая международные, публикациями в академических журналах, изданием

в Германии в течение 2011-2013 годов в соавторстве со своими коллегами 2 научных монографий по данной тематике, а также применением современных методов исследования и оборудования.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы были представлены:

- тремя докладами на Пятом международном научном семинаре 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)»;
- тремя докладами на Третьей международной молодёжной научной школе-семинаре 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)»;
- докладом на 11th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging (XTOP 2012);
- докладом на конференции «Рентгеновская оптика 2012», Черноголовка 2012 г.;
- двумя докладами на конференции «Лауэ 100», Нижний Новгород 2012 г.;
- четырьмя докладами на Четвертой международной молодежной научной школе-семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики». 19 – 27 августа 2013 г. Великий Новгород;
- двумя докладами на Шестом международном научном семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики». 19 – 27 августа 2013 г. Великий Новгород;
- четырьмя докладами на 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland;

– тремя докладами на Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia;

– тремя докладами на Пятой международной конференции «Кристаллофизика 21-го века» и Третьих московских чтениях по проблемам прочности материалов. НИТУ «МИСиС», 28 октября - 2 ноября 2013 г., г. Москва.

– на научном семинаре в Псковском государственном университете (г. Псков);

– на конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Новгородского филиала СПб ГУСЭ за 2011–2013 г.;

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 работ, из них: 2 научные монографии, 2 статьи в академическом журнале, рекомендованном ВАК, остальные – 24 представляют собой расширенные тезисы докладов на международных и российских конференциях и семинарах. Перечень публикаций приведён в заключении.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержащего 226 наименования. Объём диссертации составляет 207 страниц, включая 95 рисунков и 12 таблиц.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена литературному обзору диагностических методов (поляризационно-оптическому и топографическим), приемам расшифровки экспериментального контраста и идентификации дефектов

структуры, методам цифровой обработки экспериментального контраста, позволяющим **устранить** основные зашумляющие факторы (слабую контрастность, фоновую неоднородность и зернистость).

Во второй главе рассматриваются методики количественной оценки качества экспериментальных топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов, позволяющие существенно снизить субъективный фактор, основанный на визуальном восприятии анализируемого контраста, и в большей степени избежать ошибок при идентификации дефектов и их локализации в объеме монокристалла.

В третьей главе рассматриваются экспресс-методики регистрации цветовых характеристик и их изменений при различных внешних воздействиях и хранении для мясного сырья, колбасных изделий, воды, пива и вина.

В заключении сделаны выводы по работе и даны рекомендации по дальнейшему развитию методов цифровой обработки изображений объектов различной физико-химической природы, приведён перечень основных научных публикаций – монографий, статей и тезисов докладов.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Основные экспериментальные результаты, представленные в работе, получены соискателем или при непосредственном его участии. Постановка задач диссертационного исследования, определение методов их решения и интерпретация результатов также выполнены при непосредственном участии соискателя совместно с соавторами опубликованных работ.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ РАЗЛИЧНОГО ТИПА В МОНОКРИСТАЛЛАХ

1.1. Формирование экспериментального контраста в рентгеновской топографии

Рентгеновская топография получила широкое применение в физическом материаловедении и является прямым, неразрушающим, высокочувствительным и высокоразрешающим методом исследования дефектов структуры монокристаллических материалов. [1–4]. Рентгеновский пучок направляют на исследуемый кристалл таким образом, чтобы выполнялось условие Вульфа-Брэгга. Под действием дифрагированных пучков на фотопластинке или фотопленке формируется экспериментальный контраст.

Структурные дефекты, вносящие изменения в дифракционную картину исследуемого образца, достаточно надежно оцениваются по распределению и величине интенсивности дифракционных максимумов. Чувствительность рентгеновской топографии к структурным нарушениям имеет деформационную природу. Топографическими методами выявляются следующие дефекты: объемные (двойники, блоки, зерна, крупные включения); плоские (доменные стенки, дефекты упаковки, полосы скольжения, сетки дислокаций); линейные (дислокации); точечные (микродефекты – скопления точечных дефектов или мелких дислокационных петель, мелкие включения); большие и малоугловые границы; полосы роста; дефекты, обусловленные градиентом плотности материала [5–15].

Для описание взаимодействия рентгеновского волнового поля в кристаллах с дефектами применяются геометрическая [15–17] и дифракционная [18–22] оптики. Формирование дифракционных изображений дефектов зависит от многих факторов: условий эксперимента; интерференции блоховских волн и их лучевой и дифракционной фокусировки; сложения и разложения лучей; наклона траекторий у поверхности кристалла; интерфе-

ренции волновых полей различного происхождения; межзонного расстояния; волновых эффектов; каналирования; отражения и др.

Экспериментальные топограммы, несмотря на сложность механизмов формирования дифракционных изображений, дают наглядную и надежную информацию о дефектной структуре исследуемых монокристаллических материалов. Трудности возникают при расшифровке экспериментального контраста и идентификации дефектов структуры [1–4].

К основным топографическим методам относятся: метод Ланга; метод на основе эффекта Бормана или аномального прохождения рентгеновских лучей (РТБ); метод Берга–Баретта–Ньюкирка. Каждый из этих методов, включая их разновидности и модификации, имеет свою специфику и наиболее эффективную область применения [1–2].

1.1.1. Секционный и проекционный методы Ланга

При использовании схем на прохождение (геометрия Лауэ) рассматривается случай «тонкого» ($\mu_0 t < 1$) и «толстого» ($\mu_0 t \gg 1$) кристаллов, для которых способы формирования контраста различны (μ_0 – линейный коэффициент поглощения лучей в см^{-1} , t – толщина кристалла в см).

Для «тонкого» кристалла экстинкционный контраст обусловлен интерференцией двух типов блоховских волн. Основными трансмиссионными методами для таких кристаллов являются *секционный* [23, 24] и *проекционный методы Ланга* [25].

Секционный метод. Узкий пучок монохроматического излучения падает на кристалл, отражающие плоскости которого перпендикулярны поверхности (рис. 1.1, а). На фотопластинке регистрируется только отраженный пучок **R**. Простой контраст интенсивности для совершенного кристалла имеет вид системы параллельных интерференционных полос с осевой симметрией. Данный метод позволяет получить развертку положения дефектов по толщине исследуемого кристалла.

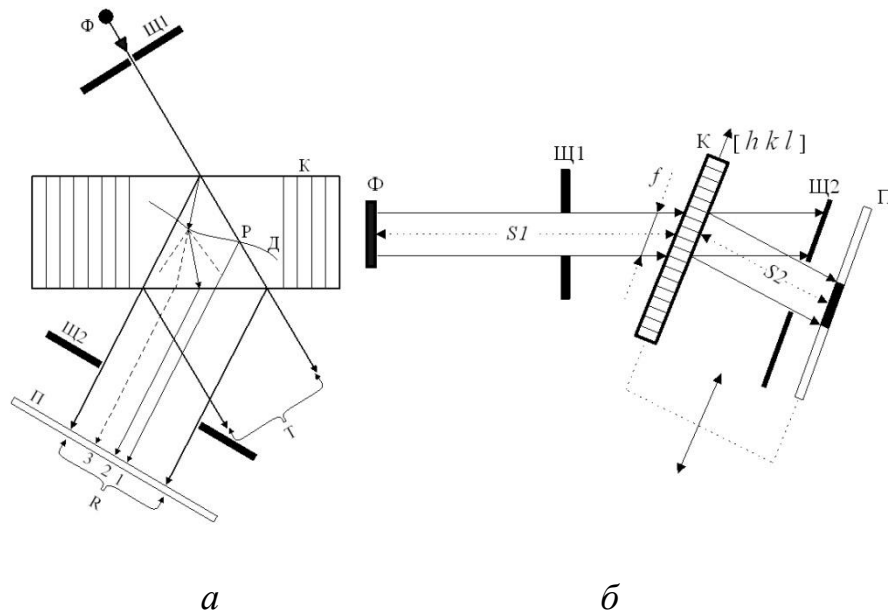


Рис. 1.1. Секционный (а) и проекционный (б) методы Ланга: Φ – фокус источника; Щ1 , Щ2 – система щелей; K – исследуемый кристалл; P – точка пересечения первичным пучком дислокации D , Π – фотопластинка; R и T – отражённый и прошедший пучки; $S1$, $S2$ – расстояния источник-образец и образец-фотопластинка соответственно; f – размер проекции фокуса источника

Проекционный метод Ланга. Применяется для получения проекции всего кристалла (рис. 1.1, б). Параллельный пучок, пройдя первую систему щелей Щ1 , падает на кристалл. Отраженный (дифрагированный) пучок R фиксируется на фотопленке, а прошедший (прямой) T экранируется второй щелью Щ2 . Для получения проекции всего кристалла и интегрального контраста, кристалл и фотопленка сканируются синхронно.

1.1.2. Рентгеновская топография на основе эффекта Бормана

При формировании теневого контраста в случае «толстого» кристалла возникает эффект аномального прохождения рентгеновских лучей (эффект АПРЛ), суть которого заключается в каналировании энергии волнового рентгеновского поля сквозь почти идеальный кристалл. Для кристалла, находящегося в отражающем по Лауэ положении, наблюдается умень-

шение коэффициента поглощения рентгеновского излучения по сравнению с кристаллом, для которого данное условие не выполняется [26–32].

Интенсивность излучения, прошедшего через кристалл в отражающем положении, определяется фотоэлектрическим поглощением (угол падения рентгеновских лучей не равен углу Брэгга, и дифракция отсутствует):

$$I_T = I_0 \exp(-\mu_0 t), \quad (1.1)$$

где I_0 – интенсивность падающей на кристалл волны, μ_0 – линейный коэффициент поглощения лучей в см^{-1} , t – толщина кристалла в см .

При равенстве угла падения рентгеновских лучей углу Брэгга интенсивность прямого пучка в «толстых» и почти идеальных кристаллах увеличивается на несколько порядков. Интенсивность прямой и отраженной волн в случае аномального прохождения лучей через идеальный «толстый» монокристалл (симметричный случай Лауэ и точная настройка по углу Брэгга) определяется выражением:

$$I_T = I_R = 0,25 I_0 \exp(-\mu_i t), \quad (1.2)$$

где μ_i – эффективный коэффициент поглощения.

Структурные дефекты кристаллической решетки снижают эффект АПРЛ. Сопоставив для «толстого» кристалла влияние дефектов различного рода на интегральную интенсивность, можно судить о средней плотности однородно распределенных дефектов [33].

Наибольший интерес представляет топографический метод, когда изображения дефектов фиксируются на фотопластинке, поставленной на пути отраженного и прошедшего «по Борману» пучков. Рентгеновские лучи в этом случае проходят через идеальные участки кристалла практически без поглощения, равномерно засвечивая фотопластинку. Участки кристалла с дефектами, частично или полностью выходят из отражающего положения, что влечет изменение интенсивности (I_T , I_R) и появление на фотопластинке контраста, связанного с наличием структурных дефектов.

В отличие от метода Ланга топография на основе эффекта Бормана (метод РТБ) более проста в реализации, предъявляет менее жесткие требования к аппаратуре, точности юстировки кристалла и расходимости пучка. Исследуемый кристалл сам отберет из расходящегося пучка излучение, падающее на отражающие плоскости под углом Брэгга.

На практике применяют две основные схемы метода РТБ – однокристалльную и двухкристалльную (рис. 1.2).

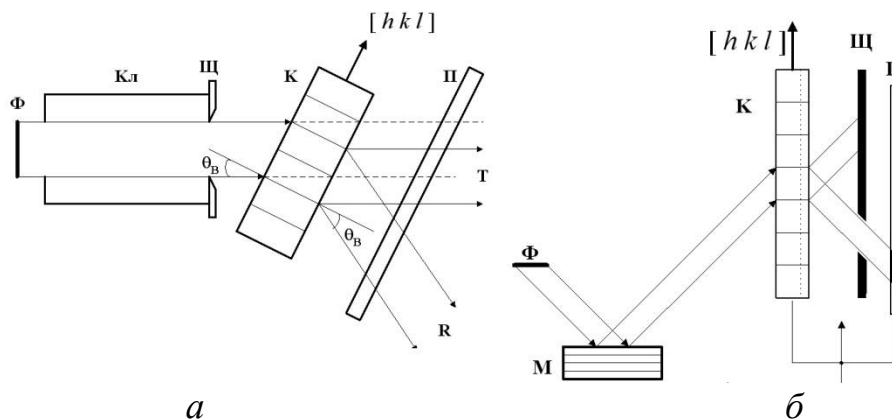


Рис. 1.2. Однокристалльная (а) и двухкристалльная (б) схемы рентгеновской топографии по методу РТБ: Φ – фокус источника; Кл – коллиматор; Щ – щель; К – исследуемый кристалл; П – фотопластинка; θ_B – угол Брэгга; R и T – отраженный и прошедший по Борману пучки соответственно; М – кристалл-монокроматор

Однокристалльный вариант, предложенный Бартом и Хоземаном [34], Герольдом и Мейером [35], получил широкое распространение в топографии. В выбранной системе плоскостей (hkl) для лучей, падающих на сильно поглощающий кристалл ($\mu_0 t \gg 1$) под углом Брэгга θ_B , будет выполняться условие аномального прохождения. Остальное излучение поглощается в кристалле. Для работы наиболее удобен симметричный лауэвский случай дифракции рентгеновских лучей (отражающие плоскости (hkl) перпендикулярны поверхности кристалла).

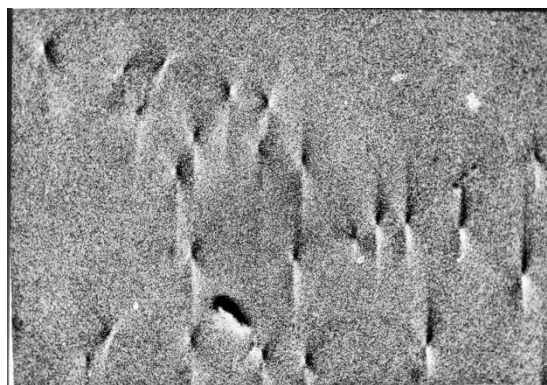
Для образцов с невысокими значениями $\mu_0 t$ ($\mu_0 t \approx 6 \div 7$) большая

часть излучения проходит через кристалл без дифракции. Уменьшение интенсивности прошедшего излучения, исключение многоволнового рассеяния и увеличение разрешения достигается применением двухкристальной схемы метода РТБ с использованием принципа сканирования (рис. 1.2, б) [36].

Метод РТБ и методики на его основе показали высокую эффективность и надежность при исследовании малодислокационных и бездислокационных материалов. Важным преимуществом этого метода является возможность расчета теоретического контраста дефектов структуры различного типа с помощью модифицированных уравнений Инденбова–Чамрова [37, 38]. Это значительно упрощает расшифровку экспериментального контраста и позволяет более надежно идентифицировать дефекты структуры исследуемых монокристаллов. Контраст, создаваемый дефектами, более выразителен, имеет вид розеток интенсивности, форма и количество лепестков которых зависят от типа дефекта и его расположения в объеме монокристалла (рис. 1.3). Метод РТБ позволяет получить не только качественную, но и количественную информацию о дефектах структуры различного типа [36, 39–43].



а



б

Рис. 1.3. Фрагменты топографического контраста монокристалла 6H-SiC, полученные методами Ланга (а) и РТБ (б), содержащие скопления краевых дислокаций

1.1.3. Метод Берга–Баретта–Ньюкирка

Метод основан на применении Брэгговской дифракции и монохроматического излучения. Рентгеновские лучи падают на кристалл под скользящим углом ($1 \div 5^\circ$) и отражаются от кристаллографических плоскостей. Возникающее асимметричное брэгговское отражение изменяет линейные размеры отраженного пучка по отношению к падающему. Метод позволяет получить топограмму всего кристалла без сканирования. При наличии дефектов дифрагированный пучок становится расходящимся и фотопластинку необходимо расположить как можно ближе к исследуемому образцу.

Метод Берга–Баретта–Ньюкирка (рис. 1.4) применяется для исследования кристаллов с высокой плотностью дислокаций (10^{10} см^{-2}), но имеет низкую чувствительность к деформациям кристаллической решётки, поэтому не применяется для исследования малодислокационных и бездислокационных кристаллов. Увеличения чувствительности метода достигается использованием кристаллов монохроматоров [1, 39, 44].

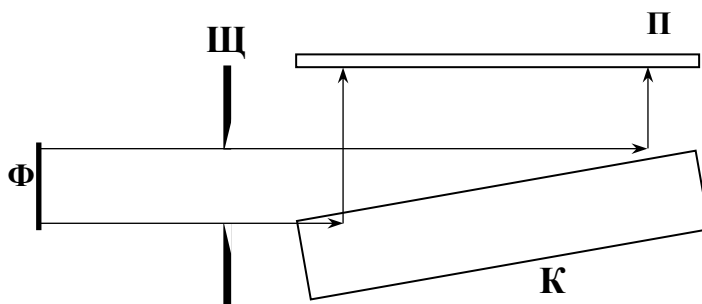


Рис. 1.4. Топографии по методу Берга–Баретта–Ньюкирка: **Ф** – источник; **Щ** – щель; **Кр** – исследуемый кристалл; **П** – фотопластинка

1.2. Формирование экспериментального контраста в методе фотоупругости (поляризационно–оптический анализ)

Метод фотоупругости – оптический метод исследования напряжений, основанный на эффекте изменения скорости света в напряженном кристалле. Метод относится к наиболее простым, неразрушающим и

надежным экспериментальным методам исследования дефектов структуры монокристаллов. Его достоинством является экспрессность и получение изображений дефектов, не лимитируемых выбором отражающих плоскостей, что существенно для рентгеновской топографии. Схема реализации метода приведена на рис. 1.5.

Методом фотоупругости выявляются макроскопические и микроскопические напряжения в монокристаллах, связанные с отдельными дислокациями [38, 45, 46]. В оптически изотропных кубических кристаллах дислокации, обладающие отличной от нуля краевой компонентой вектора Бюргерса, вызывают появление аномального двойного лучепреломления (пьезооптический эффект). Исследуя поле двойного лучепреломления вокруг дислокации, параллельной оси наблюдения, можно определить положение плоскости скольжения, знак и величину вектора Бюргерса [47].

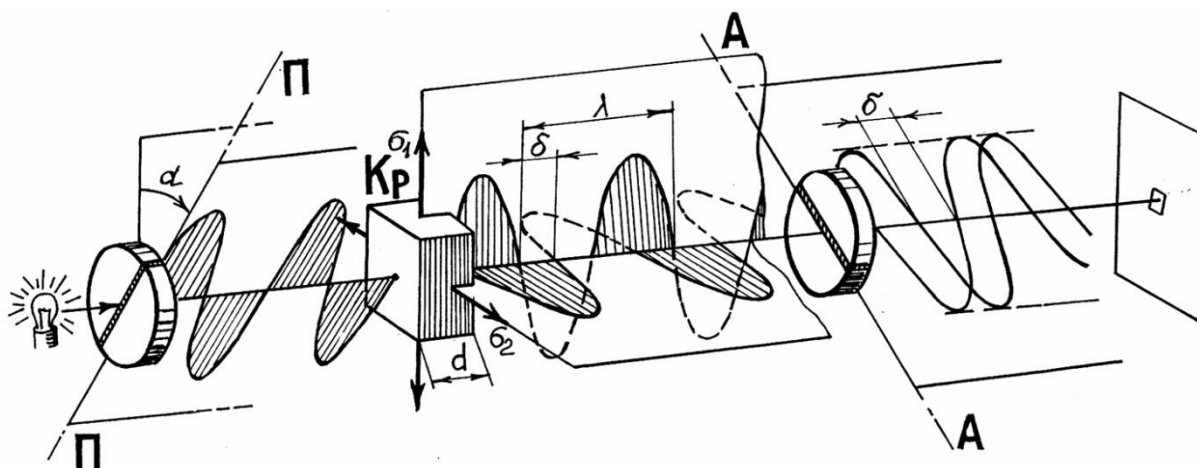


Рис. 1.5. Схема метода поляризационно-оптического анализа: **П-П** – плоскость колебаний поляризатора; **А-А** – плоскость колебаний анализатора; **Кр** – исследуемый кристалл

При наблюдении в скрещенных николях вокруг дислокации выявляется розетка интенсивности. Расчётное поле вокруг краевой или смешанной дислокации в приближении изотропного кристалла описывается розеткой равной интенсивности двойного лучепреломления, имеющей вид:

$$R = C \cos \vartheta \cos(\vartheta - \alpha), \quad (1.3)$$

где α – угол между плоскостью скольжения дислокации и плоскостью колебаний в одном из николей; C – величина, пропорциональная касательному напряжению в системе координат, повернутой относительно плоскости скольжения на угол α ; угол ϑ отсчитывается от плоскости скольжения дислокации и равен $\vartheta = (\psi + 2\alpha - 45^\circ)/2$; ψ – угол между направлением колебаний в одном из николей и направлением одного из главных напряжений (σ_1 или σ_2).

Для выявления пьезооптического эффекта, связанного с дислокацией, необходимо использовать кристаллы, толщина которых удовлетворяет условию:

$$d > \frac{\lambda r_m (1 - \nu) \sqrt{P}}{qGb}, \quad (1.4)$$

где λ – длина волны источника света, r_m – расстояние, при котором интенсивность становится меньше, чем фоновая интенсивность света, проходящего через скрещенные николи вследствие их неабсолютной поляризующей способности P , ν – коэффициент Пуассона, q – фотоупругая постоянная кристалла, G – модуль сдвига, b – модуль вектора Бюргерса. При этом условии $r_m > \lambda$ и поле двойного лучепреломления становится доступным для микроскопических исследований.

Розетки фотоупругости имеют большие размеры и наглядны, так как изображения дефектов фиксируются на высокоразрешающей фотоплёнке с небольшим увеличением (3–10 раз). Использование метода фотоупругости на практике затрудняется в силу ряда его особенностей: изменения интенсивности фона в пределах поля зрения, влияния рельефа поверхности образца на изображения дефектов и т.д. Информативность и достоверность метода повышается применением цифровой обработки экспериментального контраста, позволяющей выявить дополнительные особенности изображений дефектов [39, 40, 42].

1.3. Рентгеновская топо–томография кристаллов

Классическая рентгеновская топография и поляризационно-оптический анализ оперируют двумерными изображениями, поэтому получение информации о точной локализации дефектов в объеме монокристалла затруднительно. Применяя моделирование теоретического контраста, формируемого дефектами различного типа, и сопоставляя его с экспериментальным, можно оценить их расположение в объеме. По топограмме или фотоснимку практически невозможно точно оценить взаимное расположение в объеме монокристалла нескольких дислокаций одного или разного типа, которые могут проходить на различных расстояниях друг от друга и под разными углами к поверхности образца. Сходная проблема возникает при определении глубины залегания и взаимного расположения включений второй фазы и т.д. Благодаря технике компьютерной томографии стало возможным получение трехмерного изображения высокого разрешения. Метод является неразрушающим, простым в реализации, обладает высокой чувствительностью и надежностью.

Большая часть исследований монокристаллических материалов связана с использованием синхротронного излучения, но до настоящего времени работа с источниками синхротронного излучения для большинства российских исследователей является малодоступной. В Институте кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН (Москва) группе исследователей под руководством В.Е. Асадчикова удалось, используя лабораторные рентгеновские источники, создать на базе отечественного дифрактометра «Амур-1» томографическую установку высокого разрешения, которая успешно была применена для исследования структурного совершенства монокристаллов (рис. 1.6.) [48]. Ранее ими же была убедительно продемонстрирована возможность применения рентгеновской томографии для исследования с высоким разрешением биологических объектов [49].

Разрешение на уровне 1 мкм достигалось использованием ПЗС-матриц производства ФИАН РАН (Москва) с разрешением 13 мкм и уве-

личивающих рентгенооптических элементов на базе асимметрично срезанных совершенных кристаллов. С помощью асимметрично срезанных кристаллов возможно 20–70 кратное увеличение.

В основе микротомографии лежит структурное восстановление трехмерного объекта по совокупности его проекций, с использованием интегральных и алгебраических методов [48].

Интегральные методы основаны на точных математических решениях уравнений восстановления изображения и использовании аппарата преобразования Фурье и Радона.

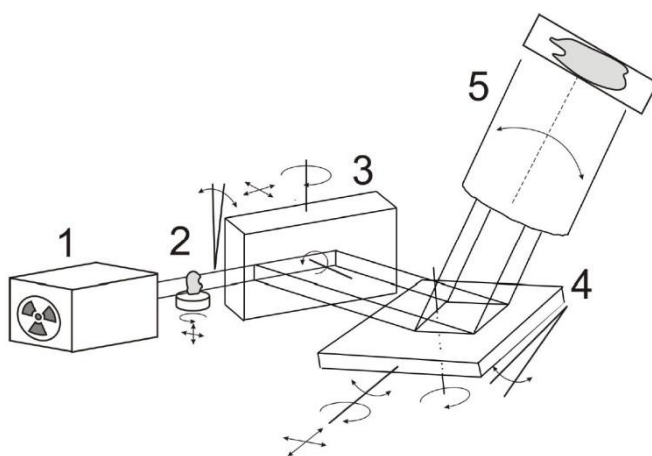


Рис. 1.6. Схема экспериментальной установки. 1 – источник, 2 – исследуемый объект на гониометрической столике, 3, 4 – асимметрично срезанные кристаллы-монокроматоры, 5 – двумерный детектор на базе CCD-матрицы [48]

Алгебраические методы восстановления изображения основаны на решении системы линейных уравнений и имеют существенный недостаток, связанный с громоздкостью вычисления. Поэтому эти системы уравнений решаются итерационными методами, например: методом свертки и обратных проекций, алгебраическими методами восстановления ART (Algebraic Reconstruction Techniques) и SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Techniques).

Топо-томография получила распространение на синхротронных

станциях 3-го поколения. Основная методическая особенность состоит в следующем. В процессе эксперимента при получении проекционных изображений ось вращения **a** должна оставаться параллельной вектору обратной решетки **G** одной из отражающих плоскостей кристалла, рис. 1.7. В результате в процессе вращения кристаллического образца на детекторе фиксируются соответствующие Брэгговские отражения (топограммы).

Дефекты структуры приводят к изменениям Брэгговского коэффициента отражения $R_g(r)$. Пространственное распределение и геометрические размеры дефектов могут быть определены из трехмерного распределения этого коэффициента. Интенсивность отраженного пучка разлагается на две части: на сигнал от совершенной кристаллической матрицы и дополнительный сигнал, являющийся результатом искажения кристаллической решетки вокруг дефектов

$$R_g(r) = R_o^{\text{соверш}} + R^{\text{деф}}(\underline{r}).$$

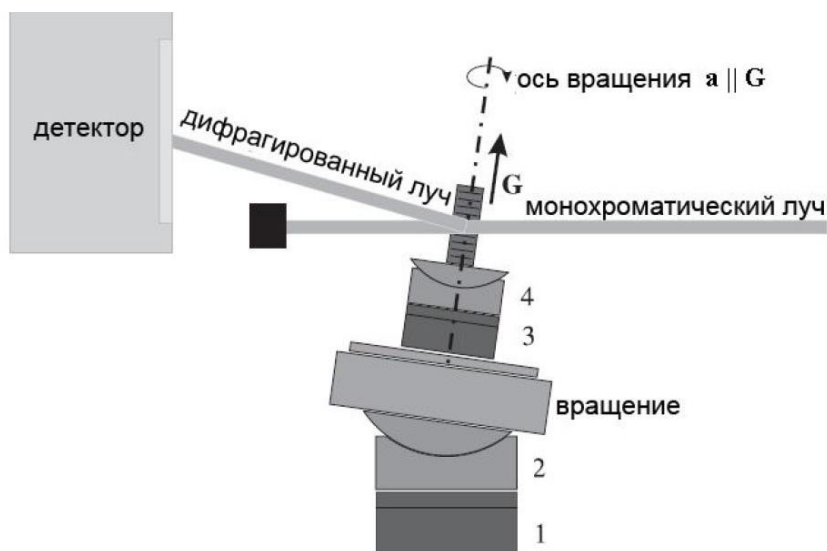


Рис. 1.7. Схема топо-томографической установки: 1, 2, 3, 4 – датчики угловых перемещений гониометра [48]

На рис. 1.8. представлен пример изображения кристалла синтетического алмаза, исследуемого в работе [48].

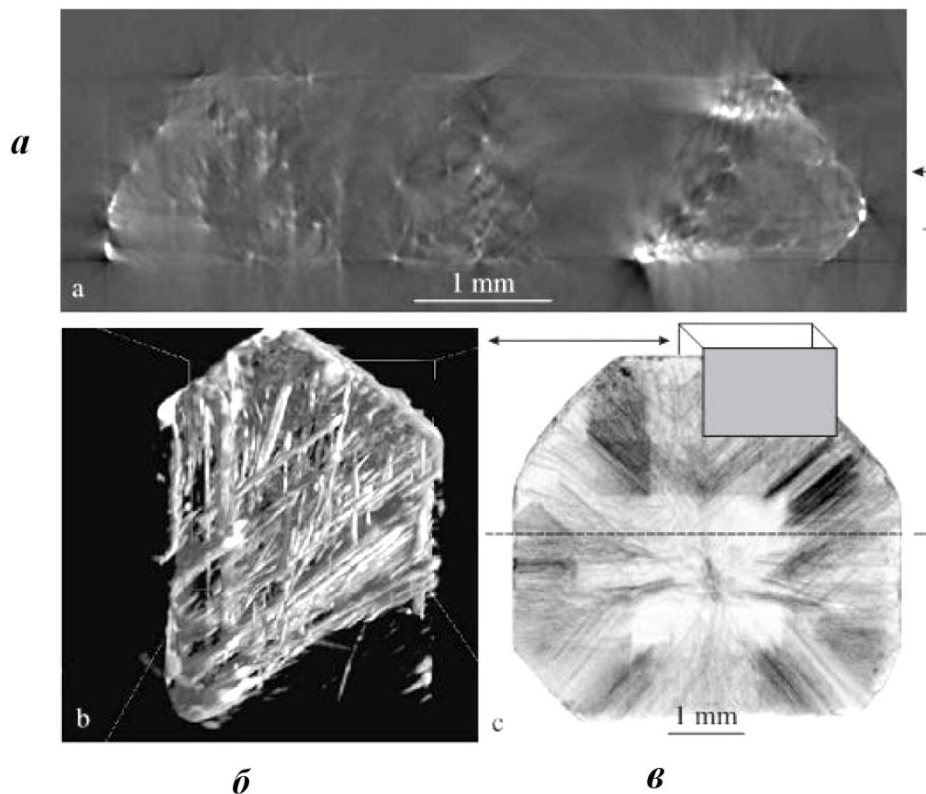


Рис. 1.8. Результаты восстановления дислокаций в синтетическом алмазе: а – сечение, полученное после процедуры реконструкции; б – восстановленное трехмерное изображение; в – топограмма кристалла.

Топо-томография является конкурентом классической топографии и имеет большие перспективы.

1.4. Расшифровка экспериментального контраста и идентификация дефектов структуры

1.4.1. Основные приемы расшифровки экспериментального контраста и идентификация дефектов структуры

Качество полученного экспериментального контраста во многом определяет надежность его расшифровки и идентификации дефектов структуры. На практике анализ проводится следующим образом (рис. 1.9):

- визуальным сопоставлением полученных изображений с ранее расшифрованными;

- визуальным сопоставлением экспериментальных изображений дефектов структуры с теоретически рассчитанными (в методе РТБ и фотоупругости теоретический контраст рассчитывается по модифицированным уравнениям Инденбома-Чамрова);

- цифровой обработкой экспериментального контраста с целью повышения его качества и устранения «зашумляющих» факторов.

Надежность расшифровки и идентификации дефектов структуры монокристаллов, а также информативность используемых диагностических методов и методик можно повысить решением следующих задач:

- усовершенствованием математической модели контраста (для методов РТБ и фотоупругости заменой модифицированных уравнений Инденбома-Чамрова на систему уравнений Такаги-Топена);

- развитием методов цифровой обработки топографических и поляризационно-оптических изображений с целью уменьшения потерь полезной информации о структурном совершенстве и вносимых искажениях;

- моделированием «зашумляющих» факторов и наложением их на теоретический контраст с последующим сопоставлением после цифровой обработки «зашумленного» и экспериментального контрастов;

- применением количественных критериев оценки качества цифровой обработки и сравнения анализируемых изображений.

Первые три задачи в большей степени основываются на визуальном анализе изображений дефектов структуры и существенно зависят от квалификации исследователя и его интуиции, т.е. имеет место высокая субъективность в оценке структурного совершенства исследуемых монокристаллов (особенно при наличии «зашумляющих» факторов).

Получение наиболее полной информации о дефектах зависит от выбора топографического метода и методики, геометрии съемки, качества используемых фотоматериалов, топограмм и фотографий [3, 42, 43, 50].

Четвертая задача до последнего времени не решена, и ее решение является главной задачей данного диссертационного исследования.

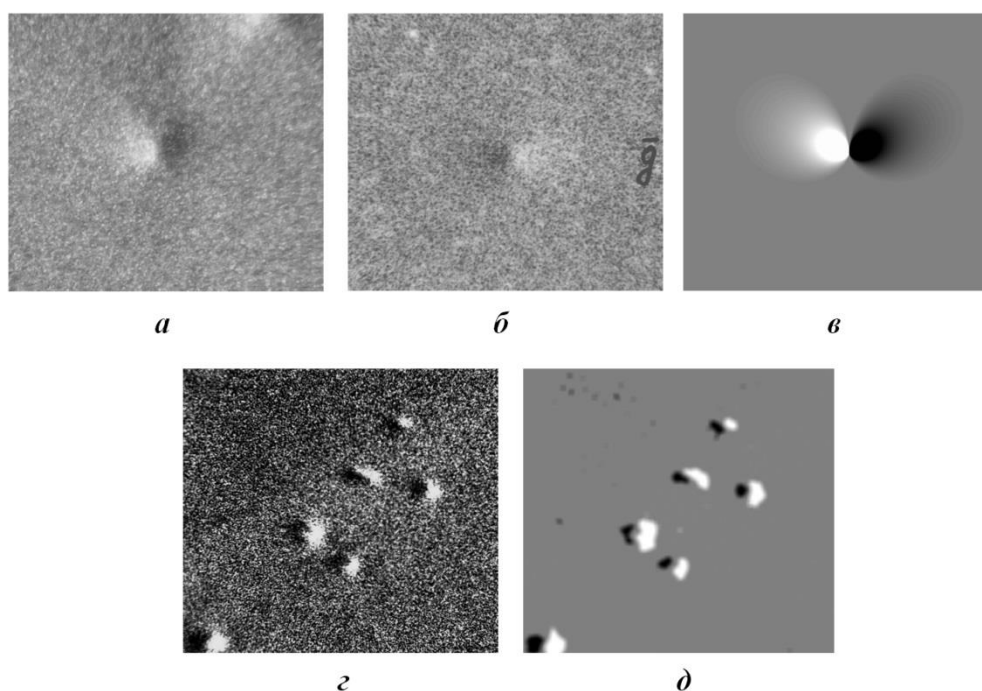


Рис. 1.9. Анализ исходного экспериментального контраста дефектов структуры монокристалла 6H-SiC (а, г): б – сопоставлением с ранее расшифрованным контрастом; в – сопоставлением с теоретически рассчитанным по модифицированным уравнениям Инденбома-Чамрова; д – при использовании цифровой обработки, основанной на анализе яркостных характеристик исходного изображения

1.4.2. Теоретическое моделирование контраста дефектов структуры монокристаллов

В рамках теории рассеяния рентгеновских лучей Пеннинга и Полдера [51] удалось решить ряд практически важных задач и описать формирование контраста в упругодеформированных кристаллах [17, 52–54]. Однако при решении задач неоднородной упругой деформации возникли принципиальные трудности.

Система фундаментальных уравнений Такаги-Топена описывает волновое поле в кристаллах [15, 55] и широко применяется для моделирования контраста интенсивности дефектов [33, 55–60], исследуемых методами Ланга (случай тонкого кристалла) и Берга-Баретта-Ньюкирка [1, 44]. Выявлено хорошее соответствие теоретического и экспериментального

контрастов интенсивности, доказывающее применимость данных уравнений к описанию рассеяния рентгеновских лучей в кристаллах с неоднородной упругой деформацией. Численные расчеты контраста интенсивности, создаваемого дислокацией в случае «тонкого» кристалла, приведены в работах [56–58, 61], а в случае «толстого» кристалла – в работах [62–64]. В работе [62] отмечают невозможность однотипного подхода к анализу топографического контраста. Для каждой методики разрабатываются специфические методы моделирования теоретического контраста интенсивности.

В методе РТБ для описания контраста, создаваемого дефектами структуры различного типа, Л.Н. Данильчуком развит подход, подобный подходу Бонзе для топографии в геометрии Брэгга [37]. Экспериментально и теоретически было доказано, что контраст интенсивности от дефектов с медленно изменяющимися полями деформаций кристаллической решетки является прямым дифракционным отображением полей деформаций и может быть аналитически рассчитан по модифицированным уравнениям Инденбома–Чамрова:

$$\begin{cases} \delta_R = \frac{I_R - I_\Phi}{I_\Phi} = \frac{-w_{2a} - w_{2b}}{\gamma_2}; \\ \delta_T = \frac{I_T - I_\Phi}{I_\Phi} = \frac{-w_{2a} + w_{2b}}{\gamma_2}, \end{cases} \quad (1.5)$$

где δ_R , δ_T – контраст интенсивности в отраженном и прошедшем по Борману пучках лучей; I_R , I_T – интенсивности отраженной и прямой волны в данной точке изображения; I_Φ – фоновая интенсивность (интенсивность в искаженном кристалле); w_{2a} , w_{2b} , γ_2 – параметры характеризующие деформацию отражающих плоскостей у поверхности выхода рентгеновских лучей. Для длины экстинкции Λ и вектора дифракции \vec{g} справедливы равенства:

$$w_{2a} = \Lambda |\vec{g}| \frac{\partial U_g}{\partial x_g} \operatorname{tg} \theta_B; \quad w_{2a} = \Lambda \vec{g} \frac{\partial \vec{U}}{\partial x}; \quad \gamma_2 = \sqrt{1 + w_2^2}; \quad w_2 = w_{2a} + w_{2b}.$$

Используя равенства (1.5) и зная поле смещения дефекта $\vec{U}(\vec{r})$, можно получить аналитические выражения контраста дефектов структуры и построить их теоретическое изображение.

В качестве примера на рис. 1.10–1.12 представлены теоретические изображения дефектов структуры различного типа в зависимости от их расположения в объеме монокристалла 6H-SiC, рассчитанные по модифицированным уравнениям Инденбома-Чамрова [65, 66].

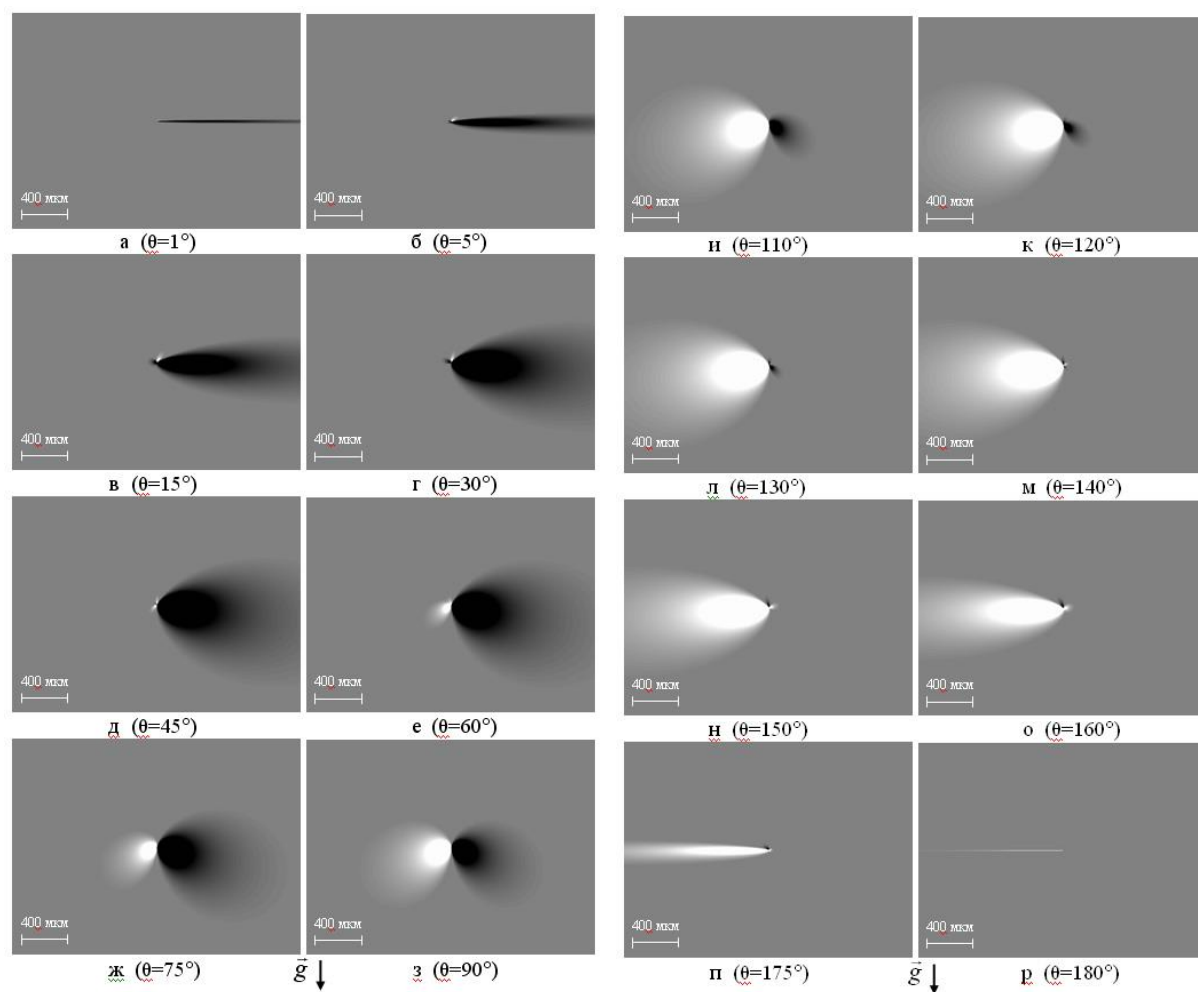


Рис.1.10. Теоретически рассчитанные изображения винтовых дислокаций, наклонённых под различными углами к поверхности в плоскости, перпендикулярной плоскости рассеяния рентгеновских лучей

Объяснения природы формирования контраста для различных типов дефектов и практические особенности использования метода РТБ детально освещены в работах [37, 38, 67–91].

Получение наиболее полной информации о дефектах зависит от выбора топографического метода, методики и геометрии съемки, качества используемых фотоматериалов, а также топограмм и фотографий [3, 50].

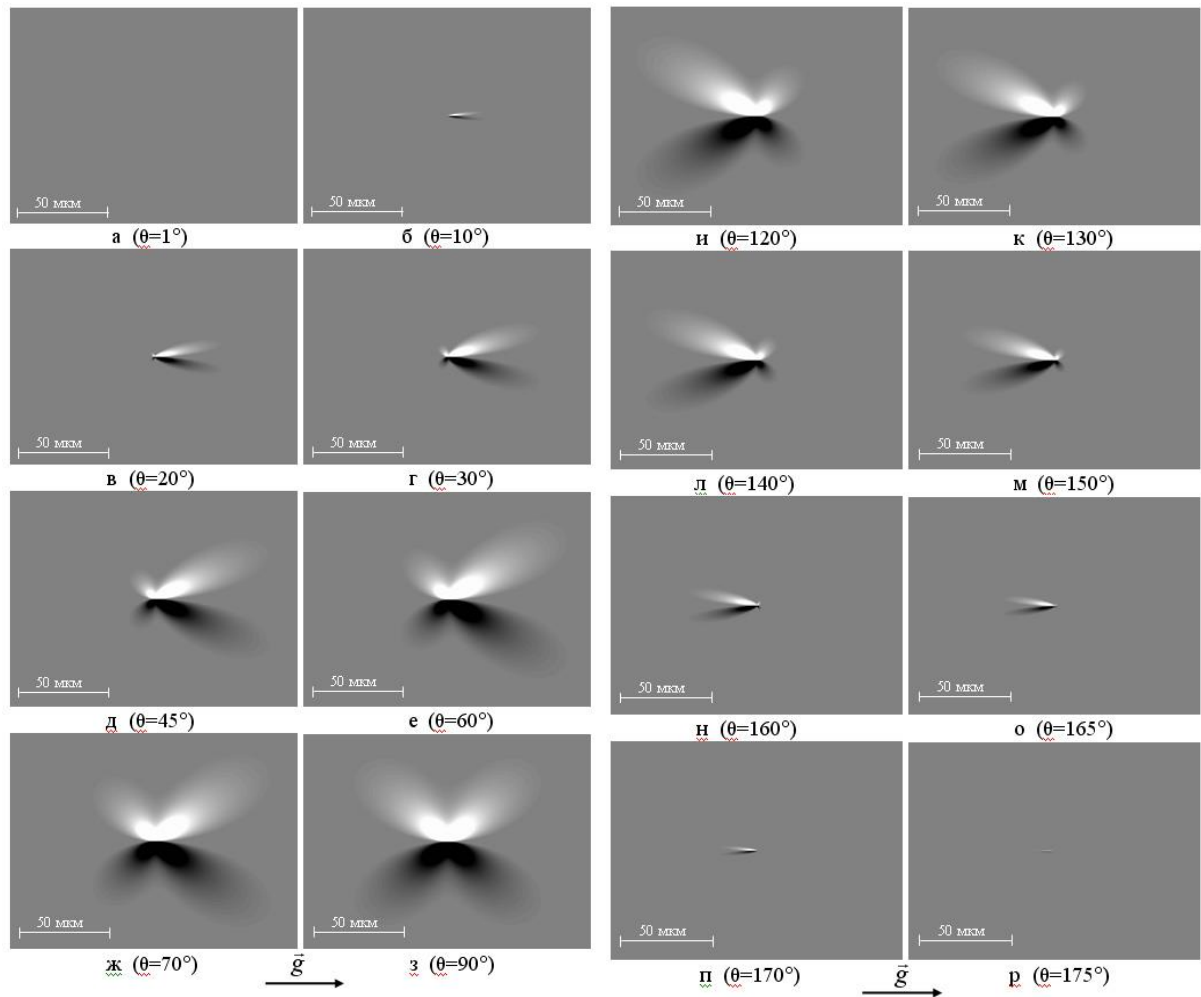


Рис.1.11. Теоретически рассчитанные изображения краевых дислокаций, наклонённых под различными углами к поверхности в плоскости рассеяния рентгеновских лучей ($\vec{b} \parallel \vec{g}$)

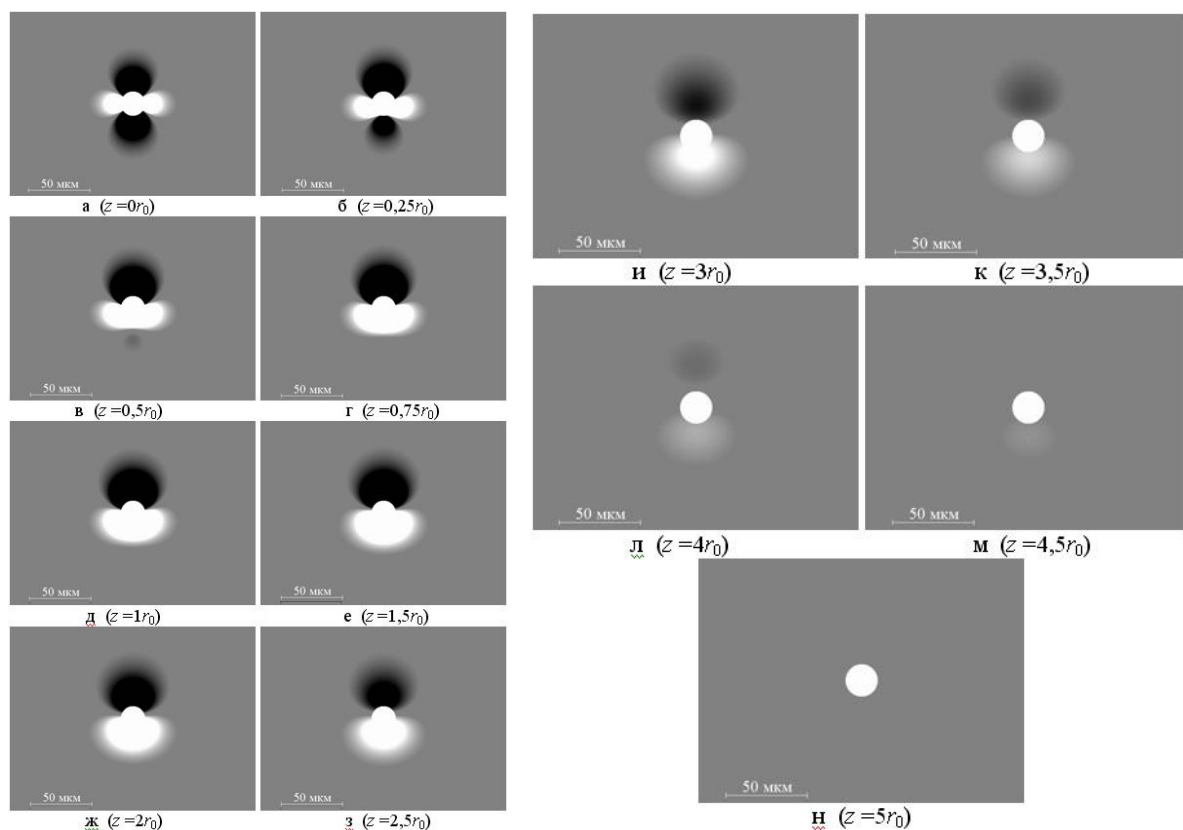


Рис.1.12. Теоретически рассчитанные изображения микродефектов в GaAs для $\varepsilon > 0$ (отражённый пучок лучей)

1.5. Основные факторы, затрудняющие расшифровку экспериментального контраста и идентификацию дефектов структуры

В методах рентгеновской топографии и поляризационно-оптического анализа изображения дефектов фиксируются на фотопластинке или фотоплёнке. Недостатки фотопластинок, как датчика интенсивности рентгеновского излучения, проявляются в том, что для различных фотопластинок зависимость плотности почернения от экспозиции различна и изменяется с течением времени, что в совокупности с наличием на этой зависимости нелинейных участков затрудняет проведение надежного количественного анализа. Возможность получения наиболее полной информации о дефектах, как уже отмечалось выше, зависит от выбора топографического метода, методики и геометрии съёмки, качества используемых фо-

томатериалов, топограмм и фотографий. Использование в топографии фотографической регистрации приводит к проблемам качества изображений, характерным для любых фотоизображений [39, 92]. Так как в методах топографии число регистрируемых рентгеновских квантов относительно невелико (до нескольких фотонов на 1 мкм^2), то на формирование изображения влияют также статистические закономерности пространственного распределения фотонов [39]. При использовании лабораторных источников рентгеновского излучения (отпаянных рентгеновских трубок) приходится искать компромисс между требованием разумности времени съёмки, которое определяется чувствительностью применяемого фотоматериала (и, следовательно, размером зерна фотоэмульсии) и необходимым разрешением. Поэтому часть дефектов, имеющих изображения меньше разрешения фотоэмульсии, методами топографии не выявляется, для части дефектов детали контраста требуется различать на фоне соизмеримого с ними зерна эмульсии. При этом зачастую требуется выявить области малые, как по размеру, так и по отличиям их интенсивности от интенсивности фона. Возникающие трудности можно существенно уменьшить за счёт применения для анализа экспериментальных снимков цифровой обработки изображений.

Слабый контраст относится к наиболее распространённым дефектам изображений (негативов, фотографий, отсканированных изображений) и ухудшает их визуальное восприятие. Слабый контраст обусловлен тем, что диапазон изменения яркости изображения относительно среднего значения меньше допустимого, и яркость меняется не от чёрного до белого, а в небольшом диапазоне от тёмного серого до светлого серого.

Фоновая неоднородность (неравномерный или неоднородный фон) проявляется в том, что различные участки топограмм и фотоплёнок могут иметь сильный разброс по степени почернения. Для топографических съёмок это связано с тем, что исследуемые монокристаллы, как правило, имеют макронапряжения, и отдельные области образца выходят из отражаю-

щего положения. Для метода фотоупругости различная интенсивность света, прошедшего через образец и скрещенные николи, обусловлена особенностями распространения поляризованного света через анизотропные и напряжённые кристаллы, а также применяемой оптической схемой. При анализе таких изображений, получая информацию с одних участков, теряем её в других. Наиболее сильная фоновая неоднородность характерна для поляризационно-оптических изображений.

Зернистость изображений («шум» зернистости контраста) возникает при регистрации изображений на ядерные фотопластинки и различные фотоплёнки высокого разрешения. Достижимое разрешение не может быть сделано сколь угодно большим. На практике для регистрации дефектов широко применяются ядерные фотопластинки с эмульсией типа МК и МР, с разрешением ~ 300 лин/мм. Зернистость изображений наиболее сильно проявляется в рентгеновской топографии, в которой дифракционные изображения дефектов обычно получают без увеличения. Для анализа и расшифровки экспериментального контраста, топограммы рассматриваются под микроскопом или перепечатываются фотоспособом с необходимым увеличением. Для рентгеновских топограмм при стократном и более увеличении серьёзным фактором, затрудняющим расшифровку экспериментальных изображений, является их высокая «кажущаяся зернистость» (гранулярность), называемая так из-за малой связи с действительным размером зёрен фотозэмульсии [93, 94]. Кажущаяся зернистость возникает из-за статистических флуктуаций небольшого количества фотонов, поглощенных единицей площади эмульсии. Даже в правильно экспонированной топограмме на 1 мкм^2 поверхности эмульсии поглощается лишь несколько фотонов (< 5). Влияние статистических флуктуаций можно уменьшить, если увеличить среднее количество фотонов, приходящихся на единицу площади. При этом эмульсия может оказаться слишком чёрной для фотографического репродуцирования или простого визуального наблюдения.

Размеры видимых зёрен изображения определяются размерами обла-

сти ионизации, которая в случае CuK_α и более мягких излучений ограничивается объёмом $\sim 1 \text{ мкм}^3$, так что фактически наблюдается один «комочек» зёрен в точке поглощения. В случае более жёстких излучений на топограммах может наблюдаться короткий трек зёрен часто с заметными на обоих его концах «комками».

Зернистость «забивает» полезную информацию, делая невозможным полное её выявление и надёжную расшифровку контраста. При расшифровке топографического контраста размер зерна фотоэмульсии часто соизмерим с размером изображения микродефектов. Следовательно, на фоне зерна изображения этих дефектов не распознаются и не учитываются при диагностике монокристаллов. Зернистость используемых фотоматериалов в некоторых случаях может приводить к неправильной идентификации дефектов, так как «теряются» их отличительные особенности.

Эффективным и надёжным способом устранения перечисленных выше «зашумляющих» факторов является цифровая обработка экспериментального контраста. Изображения дефектов структуры можно представить в виде, более удобном для визуального анализа и определения дополнительных его особенностей, выявления ядра дефекта и его локализации в объёме: трехмерное представление, построение областей равного контраста, контрастирование, построение профилей интенсивности и т.д. [39, 40, 66, 92–107].

1.6. Методы цифровой обработки экспериментального контраста

Можно выделить ряд направлений в цифровой обработке изображений, вызывающих в настоящее время наибольший интерес [108, 109]:

- улучшение качества изображений;
- количественные измерения на изображениях;
- распознавание изображений;
- компрессия изображений.

Улучшение качества изображений является классической задачей

обработки, возникшей в оптике и первоначально решаемой путем создания оптически более совершенных и специализированных оптических систем [108–110]. Появление высококачественных устройств преобразования изображений в цифровую форму позволило использовать при решении данной задачи различные методы цифровой обработки сигналов [108–118].

При представлении изображения в цифровой форме, предполагается его дискретность по пространственным координатам и по яркости. Шаг дискретизации по пространственным координатам определяется разрешающей способностью устройства преобразования исходного изображения в цифровую форму, а шаг дискретизации по яркости – его динамическим диапазоном. Изображение представляет собой массив чисел, индексы которого связаны с пространственными координатами исходного изображения, а числовые значения элементов массива связаны с яркостью исходного изображения [119]. По известной характеристике преобразования исходного изображения возможно получение числовых характеристик пространственных координат и яркости.

При распознавании изображение рассматривают как источник информации, на основе которой необходимо вынести некоторое решение [108]. Экспериментальное изображение может содержать большое количество избыточной информации [108, 109]. При передаче цифровых изображений в режиме реального времени требуется большая полоса частот, а при хранении – большой объем памяти. Поэтому для повышения экономической эффективности во многих приложениях стоит задача компрессии изображений, которая, как правило, связана с кодированием и частичной потерей информации [39].

Для повышения качества экспериментального контраста, формируемого дефектами структуры, и устранения «зашумляющих» факторов используются методы, основанные на анализе яркостных характеристик изображений [39] и на их частотном анализе [40]. Последний метод может быть реализован при использовании Фурье-преобразования (непрерывного

и дискретного) и вейвлет-преобразования (непрерывного и дискретного). Экспериментально показано, что на сегодня наибольшей эффективностью обладает цифровая обработка, основанная на дискретном вейвлет-анализе и использовании изображений с расширенным динамическим диапазоном (HDR-изображения) [40, 103, 42, 120].

В данной диссертационной работе кратко рассмотрены некоторые методы цифровой обработки, получившие наибольшее распространение при расшифровке топографического и поляризационно-оптического контраста дефектов структуры монокристаллов, разработанные в совместных с ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН научно-учебных лабораториях: «Компьютерные технологии в дифракционной диагностике материалов» (Новгородский филиал Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики) и «Рентгено-топографические методы исследования материалов электронной техники» (Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого).

1.7. Цифровая обработка, основанная на анализе яркостных характеристик экспериментального контраста

1.7.1. Устранение слабого контраста

Повышение контрастности достигается поэлементной обработкой пикселей и «растягиванием» яркости исходного изображения на весь допустимый для него диапазон (рис. 1.13) [42].

В программном пакете Matlab это осуществляется использованием стандартной функции «`imadjust`» – контрастирование с гамма-коррекцией, имеющей следующий синтаксис:

`Iout=imadjust(Iin, [in_low in_high], [out_low out_high], gamma).`

Пример устранения слабого контраста для поляризационно-оптического изображения представлен на рис. 1.13, а. Из гистограммы яркости пикселей (рис. 1.13, в) видно, что большинство элементов

изображения имеют показатели яркости в диапазоне от 80 до 200. Допустимым является диапазон $0 \div 255$. Можно преобразовать диапазон яркостей входного изображения $82/255 \div 226/255$ в диапазон $0/255 \div 255/255$ (рис. 1.13, б, г).

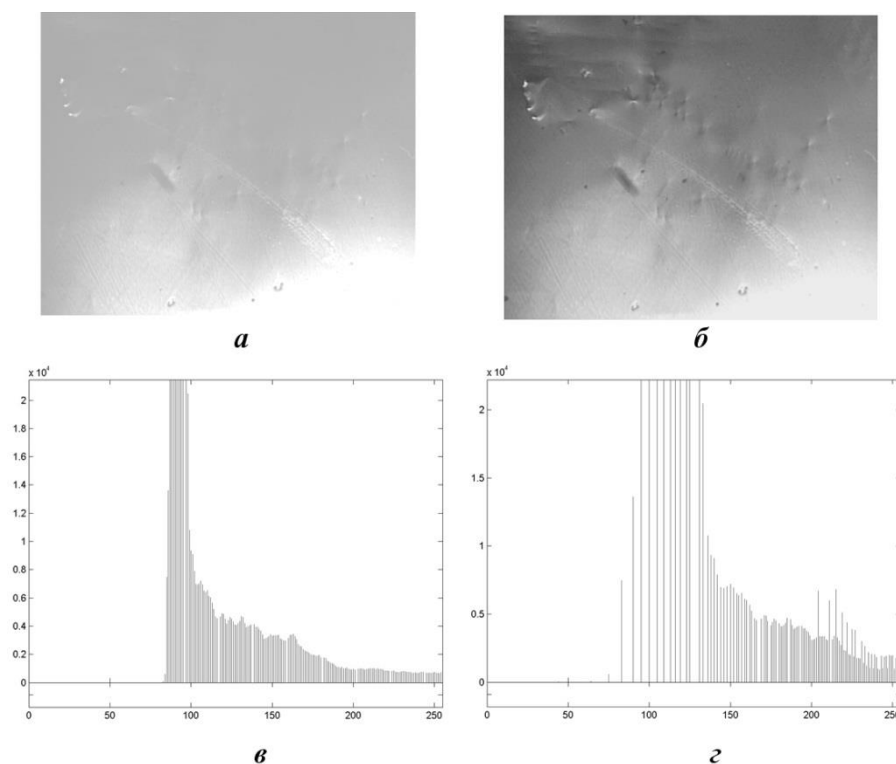


Рис. 1.13. Поляризационно-оптическое изображение монокристалла 6H-SiC: исходное (а), обработанное (б), гистограммы яркости пикселей исходного (в) и обработанного изображений (г)

1.7.2. Методы устранения неравномерного фона

При неравномерном фоне имеет место изменение яркости по всему изображению, причем интервалы этого изменения, как правило, охватывают весь динамический диапазон изображения. На снимках исследуемых образцов имеются области с очень большими и очень малыми значениями яркости, значительно превышающими размеры анализируемых деталей изображения дефектов.

Рассмотрим кратко наиболее эффективные методы устранения фоновой неоднородности [39, 92, 96, 103, 121].

Методы, основанные на высокочастотной фильтрации с предварительным логарифмированием и экспоненцированием изображения.

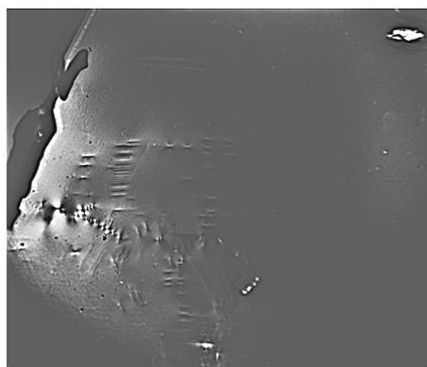
Применение линейной фильтрации к изображениям, имеющим сильно выраженный неравномерный фон, не даёт того результата, который возможно получить, если предварительно провести нелинейное усиление изображения (рис. 1.14).



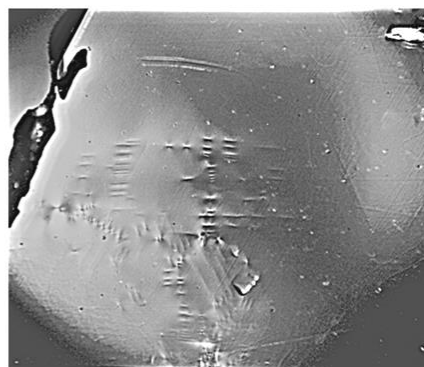
а



б



в



г

Рис. 1.14. Устранение неравномерности фона поляризационно-оптического изображения монокристалла 6H-SiC: а – исходное; б – высокочастотная фильтрация с предварительной обработкой нелинейным фильтром; в – высокочастотная фильтрация с предварительным экспоненцированием изображения; г – высокочастотная фильтрация с предварительным логарифмированием изображения

В качестве нелинейного усиления можно применить логарифмирование изображения, приводящее к большему усилению яркости тёмных пикселей и общему осветлению изображения. Последующая обработка фильтром верхних частот и контрастирование изображения позволяют выявить детали, скрытые в тёмных областях исходного изображения (рис. 1.14, г). При данном подходе получаем более полную информацию, содержащуюся в затемненных областях. Однако осветление изображения тёмных областей приводит к уменьшению контрастности светлых.

Для выделения деталей контраста в светлых областях проводим обработку изображение экспоненциальной функцией (рис. 1.14, в). Изображения дефектов в левой засветлённой области исследуемого образца стали более чёткими и имеют лучшую детализацию, чем на рис. 1.14, а. Правая часть образца остаётся недоступной для анализа [42].

Комбинированный метод. Основан на высокочастотной фильтрации с предварительной обработкой изображения нелинейным фильтром.

Нелинейный нерекурсивный фильтр позволяет одновременно выявлять детали, скрытые в тёмных и в светлых областях [39, 92, 103]. Алгоритм работы этого фильтра приведён на рис. 1.15.

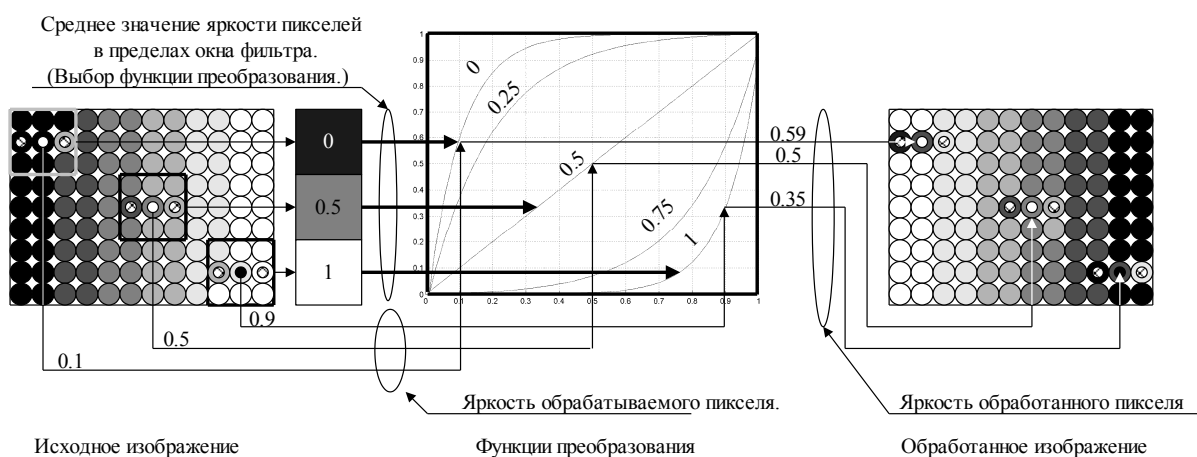


Рис. 1.15. Алгоритм работы предварительного нелинейного фильтра

Фильтрация осуществляется путём математической обработки пикселей исходного изображения, попадающих в окно фильтра. На рисунке показаны три положения окна фильтра размером три на три пикселя. Центральным пикселем окна при таком размере является второй. Окно фильтра передвигается по всему изображению таким образом, чтобы каждый пиксель изображения побывал центральным элементом окна. Сама же обработка заключается в следующем.

Вычисляется среднее значение пикселей исходного изображения, попавших в текущее положение окна фильтра. В зависимости от этого значения выбирается одна из функций преобразования центрального пикселя. После чего центральный пиксель окна фильтра обрабатывается выбранной функцией и записывается на то же место, но в обработанное изображение (при фильтрации используются только элементы исходного изображения). Далее окно фильтра сдвигается и его центральным элементом становится другой пиксель исходного изображения. Вся обработка повторяется до тех пор, пока не будут обработаны все пиксели изображения. Если среднее значение пикселей в окне фильтра меньше 0,5, то выбирается логарифмическая функция преобразования, если больше, то – экспоненциальная. Конкретный вид выбранной функции будет зависеть от среднего значения пикселей исходного изображения.

Результат обработки экспериментального контраста по данному алгоритму представлен на рис. 1.14, б. Обработка заключалась в нелинейном усилении с последующей высокочастотной фильтрацией и сжатием динамического диапазона. Сравнение контрастов на рис. 1.14, б с рис. 1.14, г и рис. 1.14, в показывает, лучшую детализацию изображений дефектов в тёмных и в светлых областях. Использование описанного фильтра приводит также к большому сжатию динамического диапазона изображения, так как для светлых и тёмных областей используются различные функции [42].

В данном фильтре возможно использование и других функций преобразования. При этом необходимым условием является плавный переход

от функций для тёмных областей к функциям для светлых областей. Если это условие не выполняется, то в обработанном изображении возникают искажения в виде контуров с резким перепадом яркости.

Если сравнить три описанных выше способа обработки, то достоинством последнего (рис. 1.14, б) является возможность более полного устранения неравномерности фона и анализа деталей изображения в тёмных и в светлых областях. Однако время обработки этим фильтром больше, чем при использовании только логарифмирования или экспоненцирования, применение которых наиболее целесообразно для предварительного анализа изображения.

Общим достоинством рассмотренных выше фильтров является возможность эффективного устранения неравномерности фона, а недостатком – усиление шума при высокочастотной фильтрации. Поэтому эти фильтры менее пригодны для обработки изображений с высокой зернистостью фотоземлюли [39, 92, 103].

Метод, основанный на гаусс-размытии экспериментального изображения и получении разностного контраста.

Высокая эффективность и экспрессность удаления фоновой неоднородности достигается цифровой обработкой по следующему алгоритму:

- гаусс-размытие исходного изображения, подбираемое экспериментально с учетом уровня неоднородности;
- построение разностного контраста между размытым и исходным изображениями;
- расширение динамического диапазона;
- сохранение изображения.

Все эти операции можно выполнить в программе «Image-Pro Plus».

Примеры применения метода представлены на рис. 1.22 и рис. 1.23. При обработке экспериментальных контрастов использовался радиус гаусс-размытия 40–100 пикселей [103].

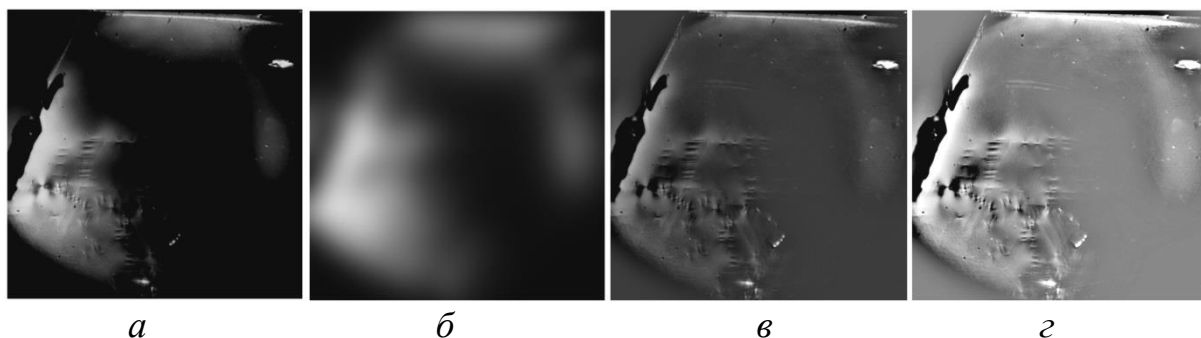


Рис. 1.16. Поляризационно-оптическое изображение монокристалла 6H-SiC, подвергнутое цифровой обработке в программе «Image-Pro Plus»: а – исходное, б – гаусс-размытие (радиусом размытия 90 пикселей), в – разностный контраст и г – расширение динамического диапазона

Гаусс-размытие и расширение динамического диапазона можно выполнять в любой специализированной программе по обработке изображений, а построение разностного контраста в программных пакетах Matlab и Mathcad. Данный способ обработки можно рекомендовать для изображений с различным уровнем фоновой неоднородности.

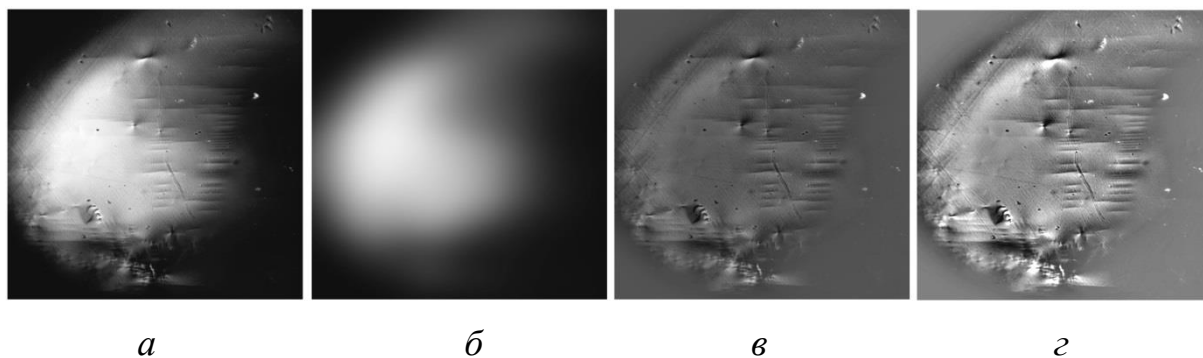


Рис. 1.17. Поляризационно-оптическое изображение монокристалла 6H-SiC, подвергнутое цифровой обработке в программе «Image-Pro Plus»: а – исходное, б – гаусс-размытие (радиусом размытия 90 пикселей), в – разностный контраст и г – расширение динамического диапазона

1.7.3. Методы устранения зернистости изображений дефектов

Зёрна фотоэмульсии являются мелкими деталями изображения. Можно предположить, что их спектральные составляющие располагаются

Перед началом фильтрации вычисляются или непосредственно задаются среднее значение шума и порог между сигналом и шумом. При дальнейшей фильтрации эти значения не изменяются. Исходное изображение дополняется по краям элементами (пикселями) таким образом, чтобы окно фильтра при обработке крайних элементов изображения не выходило за пределы полученного изображения. Такого же размера создаётся промежуточное изображение, служащее для проведения накопления, элементы которого перед началом фильтрации имеют нулевые значения. Предполагается, что при фильтрации окна фильтра на исходном и промежуточном изображениях движутся синхронно. Элементы исходного изображения, оказавшиеся в пределах окна фильтра, используются лишь для распознавания области сигнала или шума. Это распознавание осуществляется путём вычисления среднего значения этих элементов и вычитания из него заданного заранее среднего значения шума. Если полученный при сравнении модуль разности E меньше порога Π , то принимается решение, что окно фильтра находится в области шума, если нет, то в области сигнала. По принятому решению к элементам промежуточного изображения, находящимся в пределах маски фильтра, прибавляется либо весовой коэффициент шума, либо весовой коэффициент сигнала.

Весовые коэффициенты имеют положительное значение при положительной разности E средних значений элементов исходного изображения и шума и отрицательное, если эта разность отрицательна. Таким образом, сохраняется зависимость между светлыми и тёмными областями в исходном и промежуточном изображениях. Движение окна фильтра происходит до тех пор, пока все элементы изображения не побывают центральным элементом окна фильтра, после чего фильтрация прекращается. Поскольку, перед началом фильтрации к исходному изображению были добавлены дополнительные элементы, то для сохранения равенства размеров исходного и обработанного изображения они исключаются.

Результат цифровой обработки представлен на рис. 1.19 и рис. 1.20.

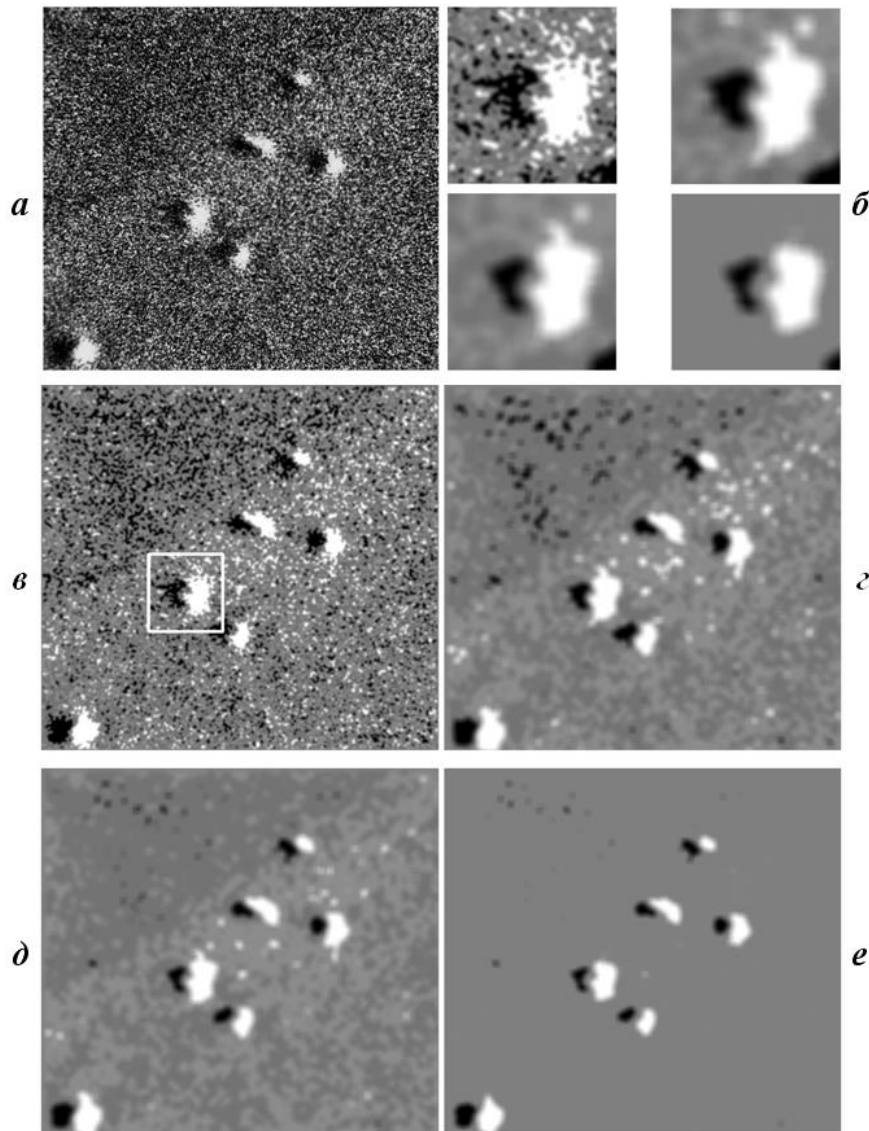


Рис. 1.19. Исходное (а) и обработанные фильтром (в–е) топографические изображения монокристалла 6H-SiC при значениях переменных программы, приведённых в таблице 1.1

Таблица 1.1

Размеры исходного изображения и значения переменных программы, при которых были получены обработанные на рис. 1.19 изображения.

(а) Исходное, размер 1153×1058	выд. область из рис. в	из рис. г
	из рис. д	из рис. е
(б) sbr×sbc=3×3, k=0.1, sm=0.42, pm=0.21	(г) sbr×sbc=10×10, k=0.1, sm=0.4, pm=0.15	
(д) sbr×sbc=10×10, k=0.1, sm=0.42, pm=0.21	(е) sbr×sbc=10×10, k=0.01, sm=0.42, pm=0.15	

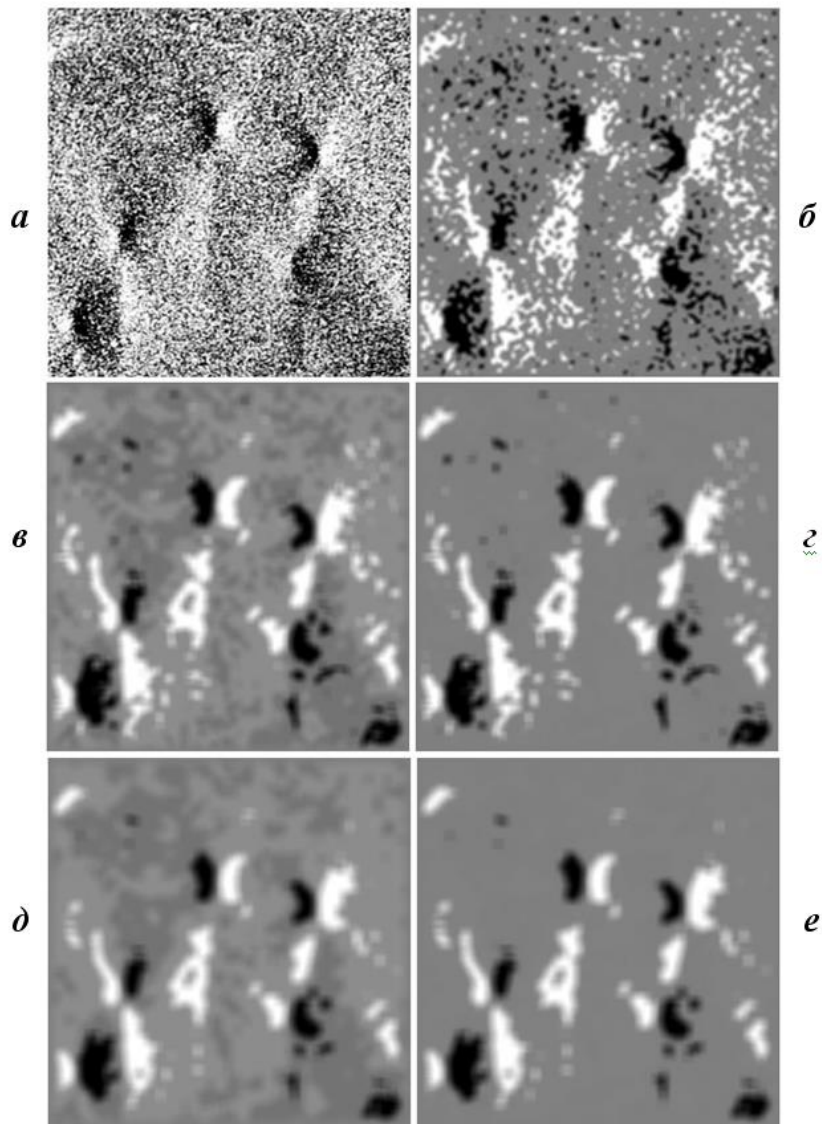


Рис.1.20. Исходное (а) и обработанные фильтром (б–е) топографические изображения монокристалла 6H-SiC при значениях переменных программы, приведённых в таблице 1.2

Таблица 1.2

Размер исходного изображения и значения переменных программы, при которых были получены обработанные изображения на рис. 1.20.

(а) Исходное, размер 816×840	(б) sbr×sbc=5×5, k=0.01, sm=0.55, pm=0.2
(в) sbr×sbc=10×10, k=0.1, sm=0.55, pm=0.2	(г) sbr×sbc=10×10, k=0.01, sm=0.55, pm=0.2
(д) sbr×sbc=13×13, k=0.1, sm=0.55, pm=0.2	(е) sbr×sbc=13×13, k=0.01, sm=0.55, pm=0.2

Заключительным этапом обработки является преобразование динамического диапазона промежуточного изображения, содержащего произвольные положительные и отрицательные значения, в область принятых для изображений значений яркости. Смысл подобной обработки заключается в том, что значение весового коэффициента для сигнала больше, чем для шума. Если в исходном изображении область под окном фильтра принята за область, содержащую сигнал, то суммирование в промежуточном изображении осуществляется с большим коэффициентом. Это приводит к усилению сигнала и ослаблению шума, что видно при подавлении зернистости на топограмме, содержащей изображения микродефектов (рис. 1.19) и краевых дислокаций (рис. 1.31) [42].

1.7.4. Способы представления изображения в виде, удобном для визуального анализа и измерения

Визуальное восприятие экспериментального контраста и надежность идентификации дефектов структуры повышается, если воспользоваться различным их представлением, например, использовать широко применяемые на практике приемы [39].

1. Контрастирование (уменьшение возможных уровней квантования):

- в градациях серого цвета, рис. 1.21, *в*, слева;
- цветное с плавным изменением палитры, рис. 1.21, *б*, слева;
- цветное с произвольным изменением палитры, рис. 1.21, *д*, слева.

2. Построение линий одинаковой интенсивности (областей равного контраста), рис. 1.21, *г*, слева.

3. Представление изображения в виде трёхмерного графика, рис. 1.21, *а–д*, посередине.

4. Построение профилей интенсивности по выбранным направлениям, рис. 1.21, *а–д*, справа.

5. Интерактивное измерение координат и яркости пикселей.

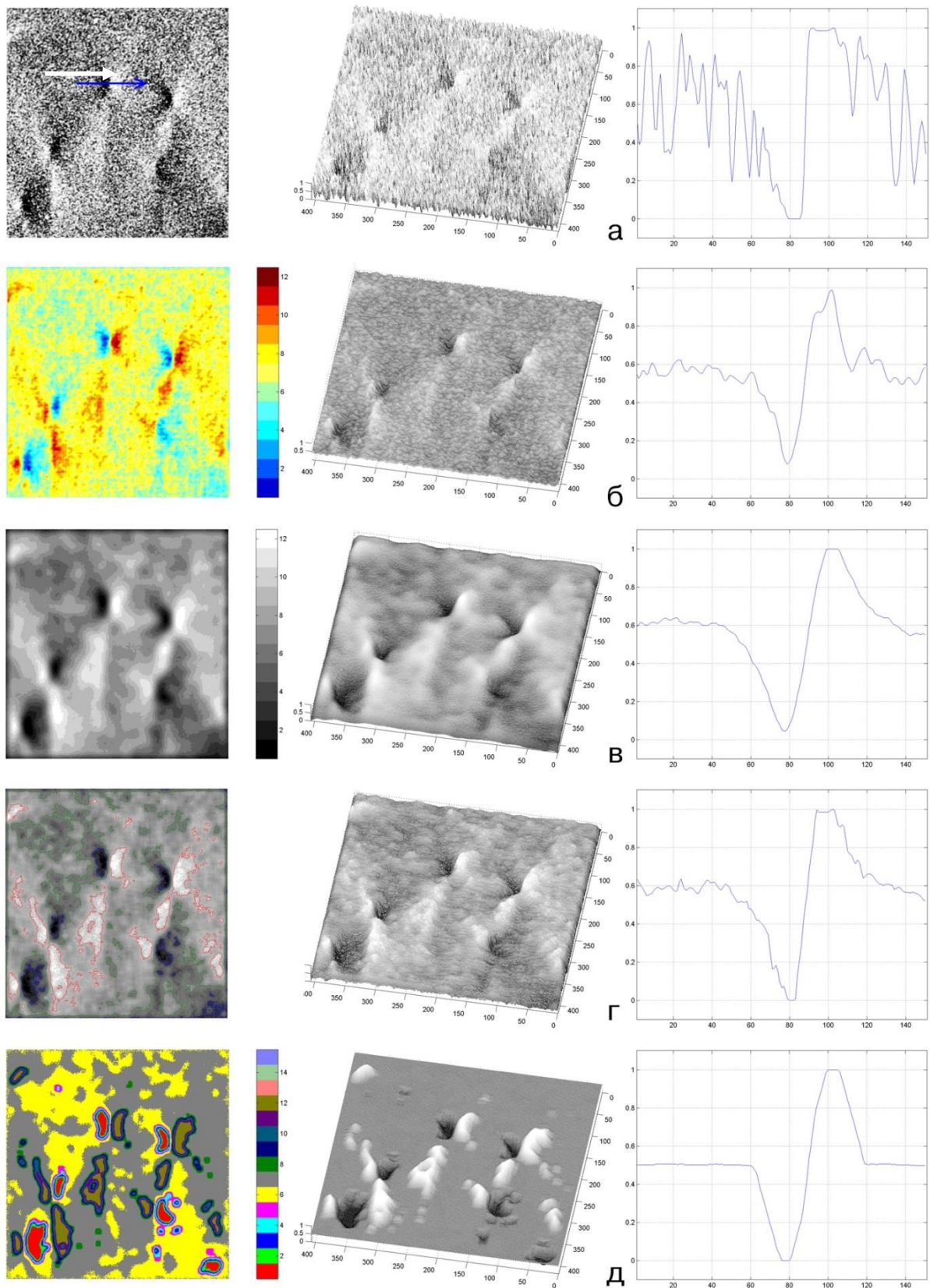


Рис. 1.21. Способы представления изображений дефектов, подвергнутых обработке различными фильтрами. Профили интенсивности снимались в направлении, указанном стрелкой

При построении трёхмерного графика по горизонтали откладываются пространственные координаты элементов изображения, а по вертикали – значения их яркости. Регистрируя на изображении значения яркости вдоль заданного направления, строится профиль интенсивности вдоль выбранного направления.

1.8. Методы основанные на частотном анализе экспериментального контраста

Большинство одномерных и двумерных сигналов, включая изображения дефектов структуры, представлены во временной (пространственной) области. Независимым параметром отображения сигнала является время, а зависимым – амплитуда сигнала. Таким образом, получается *амплитудно-временное представление* сигнала, а для статического изображения – *амплитудно-пространственное*. Для цифровой обработки такое представление не является наилучшим, так как наиболее значимая информация может быть скрыта в *частотной области* сигнала.

В общем случае частотный анализ сводится к представлению сигнала в виде конечной или бесконечной суммы некоторых элементарных сигналов – базисных функций, помноженных на весовые коэффициенты. Набор весовых коэффициентов называется частотным спектром сигнала, а коэффициенты – спектральными коэффициентами. Величина коэффициентов отражает необходимую аналитическую информацию о частотном спектре сигнала. Как правило, преобразования являются линейными, т.е. для них выполняется условие: преобразование суммы сигналов равно сумме преобразований каждого сигнала.

При компьютерной обработке часто используют дискретное представление сигнала. Линейные преобразования также переводятся в дискретную форму. На практике приходится работать со сложными изображениями, имеющими большие размеры и занимающими значительный объём памяти, поэтому для эффективной обработки изображения частот-

ные преобразования должны обладать:

- быстрыми и эффективными алгоритмами вычисления;
- возможностью преобразования двумерных сигналов;
- возможностью восстановления сигнала путём обратного преобразования;
- возможностью частотно-временного представления сигнала (ЧВР).

Существует большое количество математических преобразований, позволяющих перевести сигнал из временного (пространственного) представления в частотную область – это преобразования Фурье, Уолша, Гильберта, Хаара, Корунена-Лоэва, Адамара, Хартли, вейвлет-анализ и др. [124–127].

Для обработки топографических и оптических изображений из перечисленных выше методов наиболее доступным до последнего времени являлся Фурье–анализ, представляющий по своей сути линейную нерекурсивную фильтрацию двумерного сигнала. При нерекурсивной фильтрации для формирования элементов изображения, обработанного фильтром, используются только элементы исходного изображения. Линейным является фильтр, отклик от которого на сумму входных воздействий равен сумме откликов на каждое входное воздействие по отдельности.

Если представить входное воздействие рядом Фурье, то гармоники, проходя через линейный фильтр, не изменяют свою форму, а меняют лишь амплитуду и фазу. Это позволяет установить однозначную взаимосвязь между пространственной и частотной областями.

Линейный фильтр полностью определён, если известна его импульсная характеристика, являющаяся откликом фильтра на входное воздействие в виде дельта-функции, т.е. коэффициенты фильтра и маска фильтра. Преобразование Фурье от импульсной характеристики даёт комплексный частотный коэффициент передачи фильтра, отражающий изменение амплитуды и фазы гармонического воздействия при прохождении его через фильтр, в зависимости от частоты этого воздействия. Импульсная характеристика h и комплексный частотный коэффициент передачи H связаны

прямым $F\{ \}$ и обратным $F^{-1}\{ \}$ преобразованиями Фурье:

$$\underline{H} = F\{h\} \quad \text{и} \quad h = F^{-1}\{\underline{H}\}.$$

Достоинством линейной обработки является хорошо развитый теоретический аппарат, позволяющий проводить быструю обработку исследуемого сигнала, синтезировать фильтры с заданными характеристиками и определять параметры неизвестных фильтров. Традиционный аппарат представления произвольных функций и сигналов в виде рядов Фурье для функций с локальными особенностями, к которым можно отнести изображения, импульсные и цифровые сигналы, оказывается мало эффективным. Это связано с тем, что базисная функция ряда Фурье – синусоида определена в пространстве от $-\infty$ до $+\infty$ и по своей природе является гладкой и строго периодической функцией. Такая функция не способна в условиях ограничения числа членов ряда и спектра разложения описывать произвольные сигналы и функции.

В конце 20-го века математиками был предложен новый математический аппарат – вейвлеты, которые получили широкое применение как раз при исследовании сложных сигналов [128].

1.9. Дискретный вейвлет–анализ двумерных сигналов

Вейвлет-обработка сигналов обеспечивает:

- эффективное сжатие сигналов и их восстановление с малыми потерями информации;
- проведение надёжной фильтрации сигналов;
- создание новых и эффективных способов обработки изображений (например, декомпозиция, реставрация и идентификация изображений, удаление из них шума, сжатие файлов и т.д.).

Разнообразный набор базовых функций вейвлетов и множество их типов позволяют в отличие от Фурье-анализа, для которого базовой функцией является синусоида, наиболее просто адаптировать их к решению тех или иных практических задач [128]. Широко распространенные и попу-

лярные стандарты MP4, JPEG 2000 и известные графические программные средства Corel DRAW используют вейвлет-технологии обработки изображений [129]. Вейвлеты включены в расширение новейших систем компьютерной математики (СКМ) Matlab, Mathcad и Mathematica [121, 124, 125, 130–135]. Теория вейвлетов объединила в себе большинство идей и подходов частотного анализа сложных нестационарных сигналов и изображений [125–128, 136–139].

Теория вейвлетов. Исходный непрерывный сигнал рассматривается как функция $f_0(x)$, принадлежащая подпространству кратно-масштабного анализа сигнала (КМА) V_0 . Дискретная версия сигнала $f_0(x)$ интерпретируется, как последовательность коэффициентов $c_{0,k} = c_k$ при скейлинг-функциях, полученных в ходе кратно-масштабного разложения:

$$f_0(x) = \sum_k c_{0,k} \varphi_{0,k}(x). \quad (1.6)$$

Можно вычислить аппроксимации этой функции для пространств V_1, V_2, \dots . Согласно (1.6), функция $f_0(x)$ декомпозируется как:

$$f_0(x) = f_1(x) + e_1(x) = \sum_k c_{1,k} \varphi_{1,k}(x) + \sum_k d_{1,k} \psi_{1,k}(x). \quad (1.7)$$

Дискретный сигнал c_k представляется последовательностями коэффициентов $c_{1,k}$ и $d_{1,k}$. Этот процесс можно продолжить дальше по $f_1(x)$ и получить совокупность последовательностей $c_{2,k}$, $d_{2,k}$ и т.д.

Согласно (1.7) вычисления зависят от непрерывных функций $\varphi(x)$ и $\psi(x)$. Итеративное вычисление коэффициентов $c_{n,k}$ и $d_{n,k}$ для произвольного масштаба n без непосредственного использования функций $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ проводится по формулам:

$$c_{n,k} = 2^{1/2} \sum_m c_{n-1,m} h_0(2k+m), \quad (1.8)$$

$$d_{n,k} = 2^{1/2} \sum_m c_{n-1,m} g_0(2k+m). \quad (1.9)$$

Таким образом, получаем полностью дискретный процесс декомпо-

зиции для дискретного сигнала вида $c_{0,k} = c_k$.

Формула реконструкции последовательности c_{n-1} из c_n и d_n представлена выражением:

$$c_{n-1,m} = 2^{1/2} \sum_k c_{n,k} h_0(2k+m) + 2^{1/2} \sum_k d_{n,k} g_0(2k+m). \quad (1.10)$$

Получается вейвлет-ряд дискретного времени (Discrete-Time Wavelet Series, DTWS), являющийся основой дискретного вейвлет-преобразования конечных сигналов (Discrete Wavelet Transform, DWT).

DWT применяется к сигналам конечной длины и выдаёт на выходе последовательность коэффициентов той же длины. В случае конечного сигнала существует проблема его продолжения на границе. Для ортогонального вейвлет-базиса подходит периодическое продолжение сигнала, как и в случае дискретного преобразования Фурье (Discrete Fourier Transform DFT) [136, 140–142]. В этом случае DWT есть только один период (длина сигнала) DTWS сигнала $\tilde{c}_{0,k}$, полученного путём бесконечного периодического продолжения $c_{0,k}$.

Последовательности $h_0(k)$ и $g_0(k)$ являются импульсными характеристиками фильтров: h_0 с НЧ фильтр и g_0 – ВЧ фильтр. Предполагается, что функции $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ ограничены в пространстве и в частотной области, что означает финитность последовательностей $h_0(k)$ и $g_0(k)$. Таким образом получаем цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтры).

Соотношения для фильтров $h_0(k)$ и $g_0(k)$ в точности соответствуют квадратурно-зеркальным фильтрам (КЗФ) и ортонормированным фильтрам двухканальной системы субполосного кодирования [136, 137, 142–144]. На практике, в цифровой обработке сигналов DWT рассматривают, как блок фильтров, аналогичный системе анализа-синтеза (А-С) (рис. 1.22) и КЗФ.

Поскольку имеется два фильтра $h_0(k)$ и $g_0(k)$, то банк фильтров DWT является двухполосным и представлен на рис. 1.23.

Фильтры H и G являются соответственно НЧ и ВЧ фильтрами анализа, а F и E – НЧ и ВЧ фильтрами синтеза. Импульсные характеристики F и E определяются следующим образом:

$$f_0(k) = h_0(-k), \quad e_0(k) = g_0(-k). \quad (1.11)$$

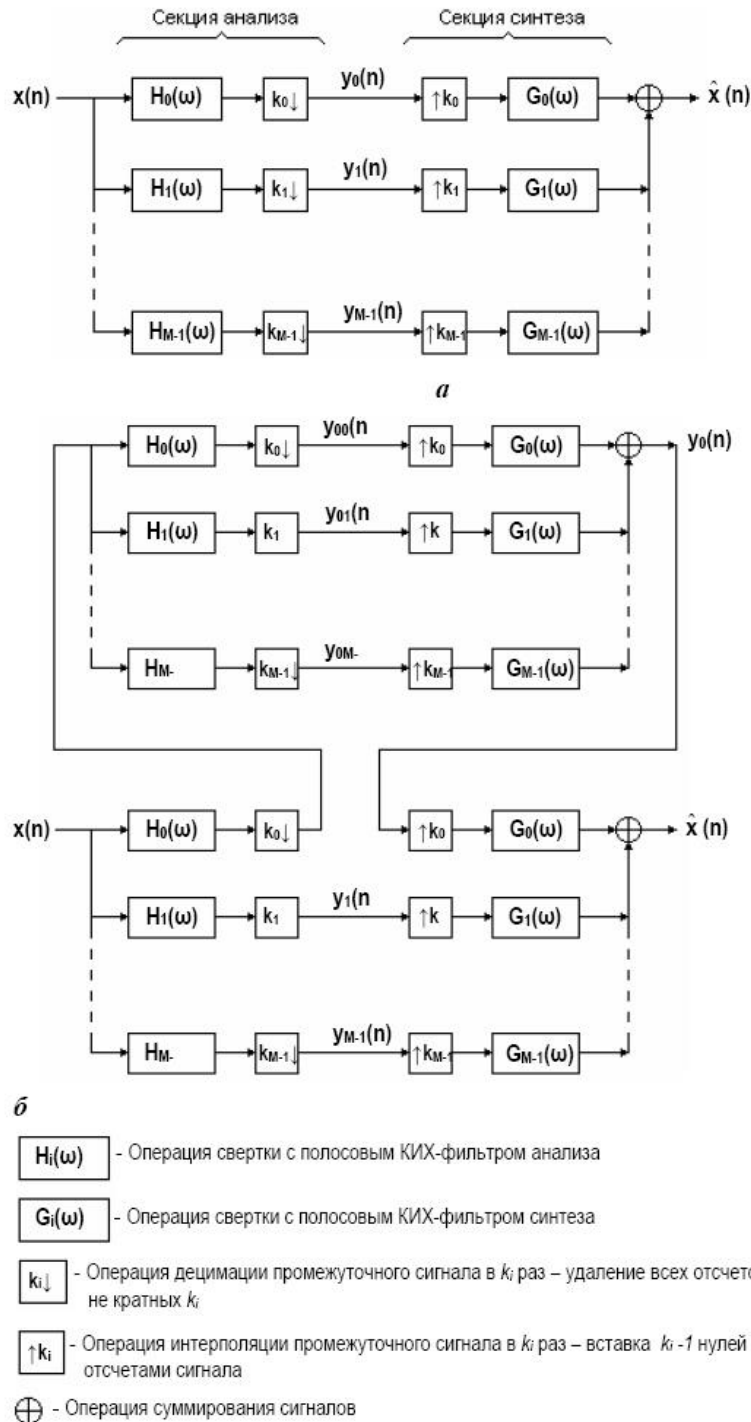
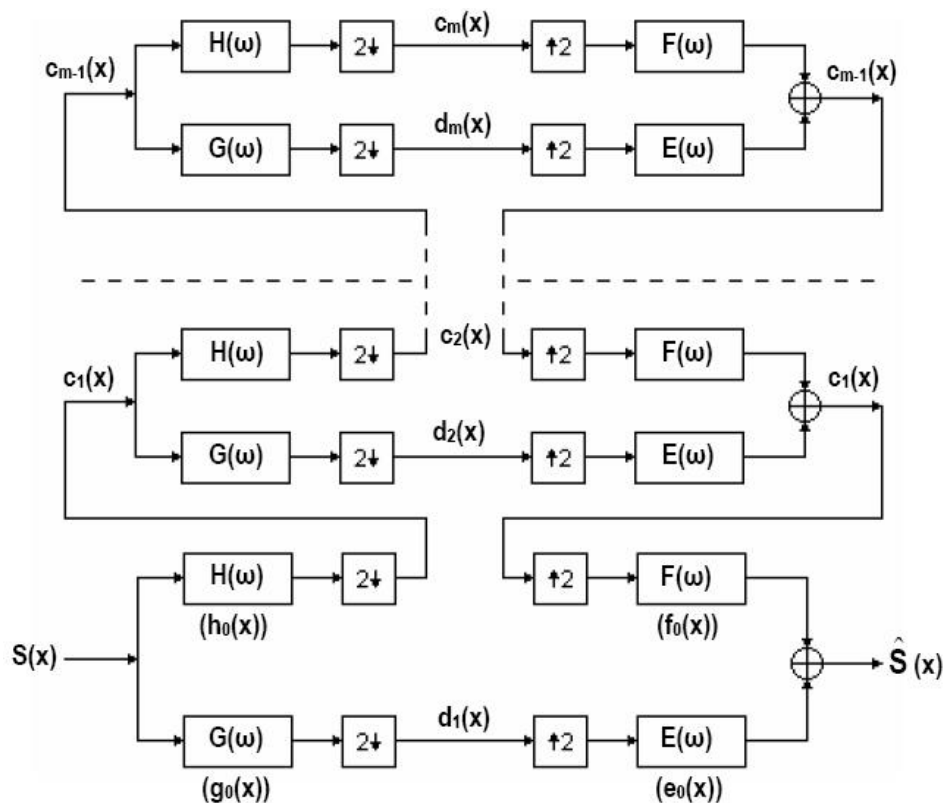


Рис. 1.22. Блок (банк) фильтров субполосного кодирования (система анализа–синтеза (А–С)) (а) и вариант каскадного соединения А–С (б)



- $E(\omega)$ - Операция свертки с ВЧ вейвлет-фильтром реконструкции
- $F(\omega)$ - Операция свертки с НЧ вейвлет-фильтром реконструкции
- $G(\omega)$ - Операция свертки с ВЧ вейвлет-фильтром декомпозиции
- $H(\omega)$ - Операция свертки с НЧ вейвлет-фильтром декомпозиции
- $2\downarrow$ - Операция децимации сигнала вдвое (двоичная децимация – удаление всех отсчетов, порядковые номера которых не кратны 2)
- $\uparrow 2$ - Операция интерполяции сигнала вдвое (двоичная интерполяция – вставка по одному нулю между каждыми отсчетами)
- \oplus - Операция суммирования сигналов

Рис. 1.23. Неравномерный (древовидный) блок фильтров дискретного вейвлет-преобразования – пирамидальный алгоритм Маллата (могут также использоваться названия DWT или FWT)

В результате имеем две субполосы: НЧ и ВЧ полосу. Исходный сигнал S уровня $n=0$ схема рис. 1.23 делится на два сигнала уровня $n=1$. При этом НЧ субполоса содержит некоторую аппроксимацию сигнала, лишённую деталей (выражение (1.8)). ВЧ субполоса содержит детальную

ВЧ информацию о сигнале (выражение (1.9)). DWT получается путём рекурсивного применения данной схемы к НЧ субполосе сигнала (коэффициентам аппроксимации уровня $n=1$), аналогично схеме КЗФ. В итоге получается неравномерный (древовидный) банк фильтров, который носит название *пирамидального алгоритма Маллата* [136, 137, 145–147].

При определённом уровне разложения $n=m$ на выходе секции анализа схемы имеем аппроксимацию сигнала A_m и набор его деталей D_1, \dots, D_m . В соответствии с алгоритмом Маллата для каждого уровня реконструкции можно абстрактно записать следующее соотношение:

$$S = A_1 + D_1 = A_2 + D_2 + D_1 = A_3 + D_3 + D_2 + D_1 = \dots = A_m + \sum_{n=m}^1 D_m. \quad (1.12)$$

Если фильтры DWT являются ортонормированными, возможно полное восстановление сигнала по коэффициентам DWT.

Особенности вейвлет-анализа изображений. Изображения относятся к двумерным сигналам, поэтому необходимо рассматривать две координаты – x и y . Вейвлет-базис представляется функцией двух переменных и для непрерывного случая записывается в виде:

$$\psi(x, y) = \frac{1}{\sqrt{a_1 \cdot a_2}} \psi_0\left(\frac{x-b_1}{a_1}, \frac{y-b_2}{a_2}\right), \quad (1.13)$$

где a_1 , b_1 , a_2 и b_2 – параметры, относящиеся, соответственно, к изменениям сигнала по x и по y .

Двухмерный вейвлет-базис можно также выразить через тензорное произведение одномерных функций, тогда имеем одну скейлинг- и три вейвлет-функции вида:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) &= \varphi(x) \varphi(y); \\ \psi_1(x, y) &= \varphi(x) \psi(y); \\ \psi_2(x, y) &= \psi(x) \varphi(y); \\ \psi_3(x, y) &= \psi(x) \psi(y). \end{aligned} \quad (1.14)$$

На рис. 1.24 представлено изображение двумерного вейвлет-базиса на основе вейвлета Симлета со степенью гладкости функции 8 [121, 128].

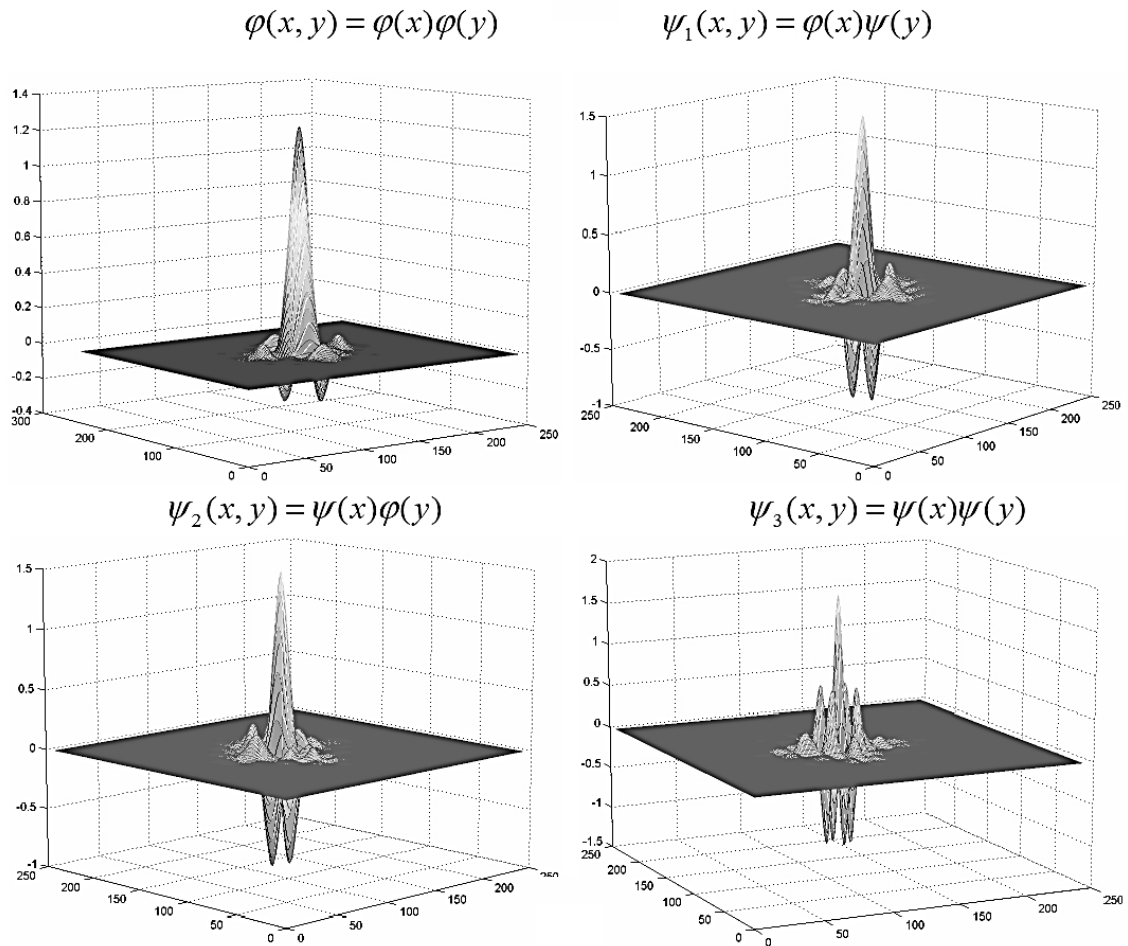


Рис. 1.24. Изображения функций двухмерного вейвлет-базиса Симлета со степенью гладкости функции 8

На практике двухмерный вейвлет-базис, как правило, не используется. Для изображений простейшим видом вейвлет-базиса является separable basis, получаемый сжатием и растяжением одномерных вейвлетов [136, 144, 148–152]. В этом случае DWT двухмерных сигналов строится на базе одномерных КИХ-фильтров (схемы рис. 1.23). Пирамида Маллата применяется отдельно к строкам и столбцам изображения, как к одномерным конечным сигналам. Алгоритм двухмерного DWT имеет структуру, полностью аналогичную схеме рис. 1.25, а.

Рассмотрим двухмерный алгоритм DWT с учётом обозначений, принятых в математическом пакете Matlab. Обозначения фильтров DWT заменяются следующим образом:

$H = \text{Lo_D}$ (decomposition low-pass filter);

$G = \text{Hi_D}$ (decomposition high-pass filter);

$F = \text{Lo_R}$ (reconstruction low-pass filter);

$E = \text{Hi_R}$ (reconstruction high-pass filter).

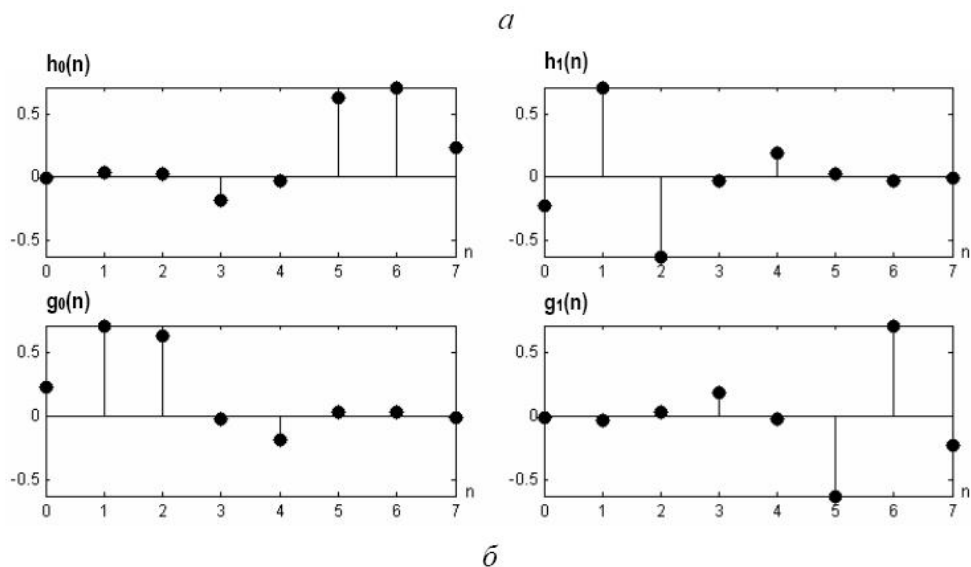
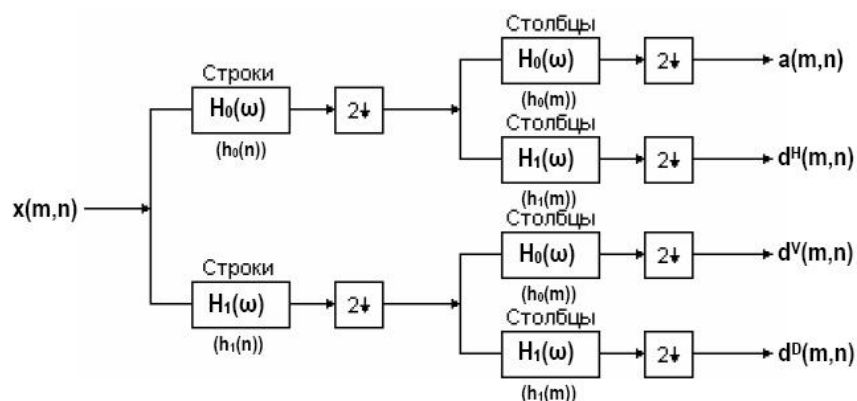


Рис. 1.25. Субполосное преобразование изображений на основе разделимого базиса: а – двухмерный блок фильтров субполосного кодирования; б – импульсные характеристики одномерных ортонормированных 8-элементных фильтров Добеши [143, 147]

С учётом новых обозначений на рис. 1.26 представлен алгоритм двухмерной дискретной вейвлет-декомпозиции (DWT), а на рис. 1.27 – алгоритм двухмерной дискретной вейвлет-реконструкции изображений (Inverse Discrete Wavelet Transform, IDWT) [42].

В данной схеме CA_j – входная матрица коэффициентов аппроксимации, полученных на стадии декомпозиции уровня n . При $n=0$ матрица CA_0 – представляет собой исходное изображение. Матрица горизонтальных детализирующих коэффициентов CD^H содержит детали изображения, протяжённые в горизонтальном направлении. Соответственно, вертикальные коэффициенты CD^V передают вертикальные детали изображения, а CD^D – диагональные.

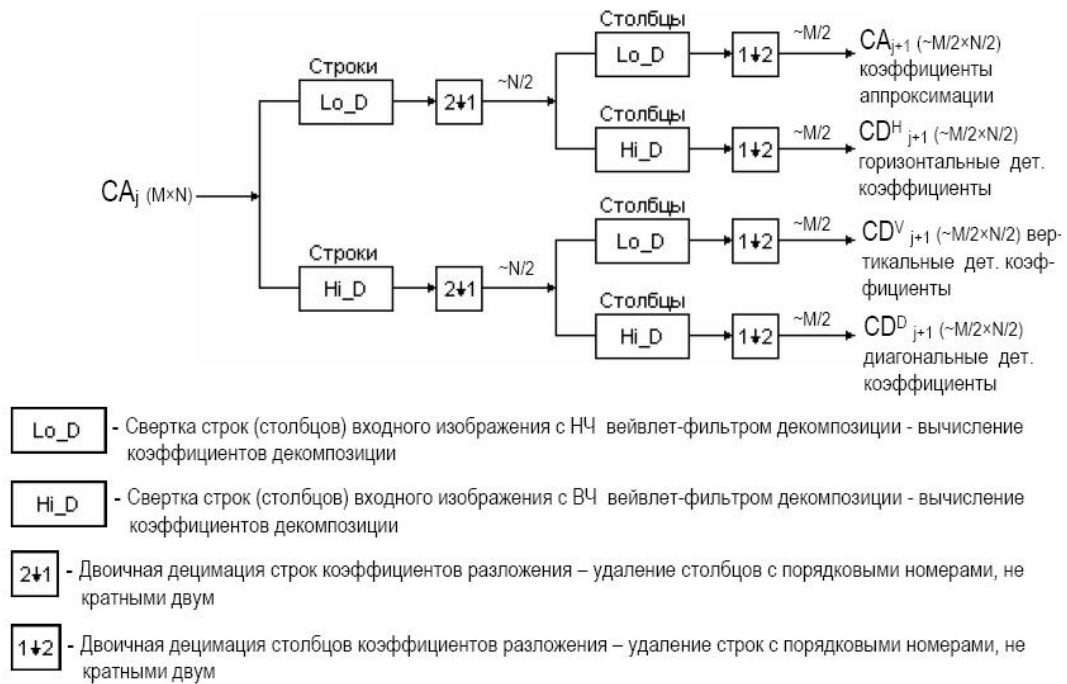


Рис. 1.26. Один уровень двумерной дискретной вейвлет-декомпозиции изображения (DWT)

Пусть исходное изображение имеет размер $M \times N$, где N – длина каждой строки (количество столбцов), а M – длина каждого столбца (количество строк). Предположим, что $N = 2^d$ и $M = 2^d$ (где $d = 1, 2, 3, \dots$). Обозначим через L длину фильтра $Lo_D = Lo_R = Hi_D = Hi_R$. На стадии декомпозиции для первого уровня разложения после операции свертки с КИХ-фильтром и двоичной децимации каждая строка коэффициентов декомпозиции изображения имеет длину $(N + L - 1)/2$. Это справедливо и для

столбцов, имеющих длину на первом уровне декомпозиции порядка $(N + L - 1)/2$. На следующих уровнях разложения происходит аналогичное сокращение длины с добавлением $(L - 1)$ и делением полученного результата на 2. Если производить реконструкцию сигнала, то после операции интерполяции вдвое и последующей свертки с КИХ-фильтром реконструкции длина каждой строки восстановленного изображения составляет $2((N + L - 1)/2) + L - 1 = N + 2L - 2 \neq N$. Это относится и к длине столбцов восстановленного изображения.

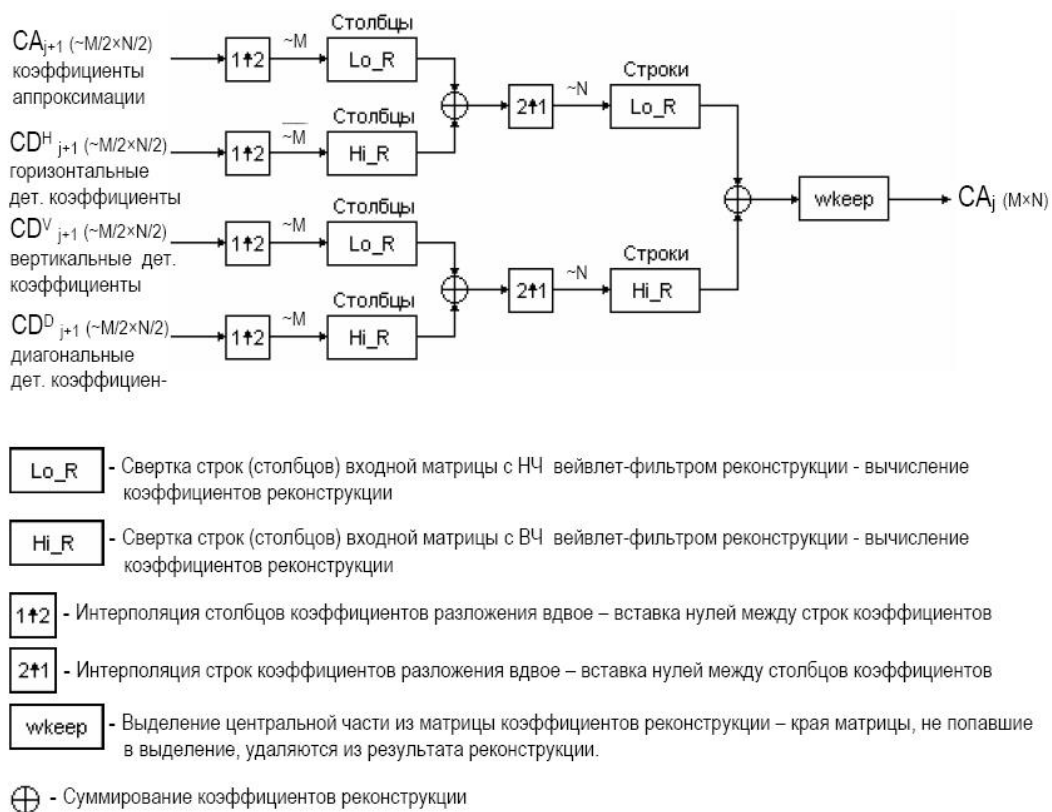


Рис. 1.27. Один уровень двухмерной дискретной вейвлет-реконструкции изображения (IDWT)

Размеры восстановленного изображения превосходят размеры исходного на величину порядка $2(L - 1)$, вследствие чего, в алгоритм реконструкции IDWT введён блок *WKEEP*, который сохраняет центральную часть восстановленной матрицы и отсекает её края, сравнивая размеры восстановленной и исходной матриц на каждом шаге реконструкции. Размеры матрицы восстановленных коэффициентов $CA_{n,rec}$ ($n > 0$) должны

совпадать с размерами ранее полученных матриц $CD_n^H dec$, $CD_n^V dec$ и $CD_n^D dec$. В противном случае дальнейшая реконструкция коэффициентов CA_{n-1} в соответствии с алгоритмом IDWT будет невозможной. Таким образом, блок *WKEEP* позволяет привести размеры матрицы $CA_0 rec$ к размерам исходного изображения.

Рассмотрим примеры применения дискретного вейвлет-анализа для решения практических задач, связанных с устранением основных зашумляющих факторов топографического и поляризационно-оптического контраста и повышением его качества.

1.10. Устранение фоновой неоднородности

Напомним, что фоновая неоднородность выражается в сильном разбросе степени почернения различных участков топограмм и фотонегативов. При анализе неоднородных по фону изображений, получая информацию с одних участков, теряем её на других. Применяя цифровую обработку экспериментального контраста, основанную на дискретном вейвлет-анализе, можно выявить полезную информацию как с сильно затемненных, так и с сильно осветленных областей топограмм и фотонегативов [36, 40, 41, 153–157].

Наиболее полная информация об анализируемом контрасте лежит в его частотной области. Проведенные исследования показали, что цифровая обработка топографического и поляризационно-оптического контраста, содержащего изображения дефектов структуры, на основе дискретного вейвлет-анализа обладает рядом преимуществ по сравнению с Фурье-анализом и цифровой обработкой, основанной на анализе яркостных характеристик [36, 40, 158, 159].

Если рассматривать частотный спектр изображений с ярко-выраженной фоновой неоднородностью, то очевидно, что неоднородный фон и контраст от дефектов находятся в разном частотном диапазоне: не-

однородный фон занимает низкие и сверхнизкие частоты, а контраст от дефектов находится на средних и высоких частотах. Используя алгоритм дискретного вейвлет-разложения, можно провести отдельную фильтрацию низких и высоких частот.

При дискретном вейвлет-анализе проводится декомпозиция двумерного сигнала – разложение изображения в ряд базисных элементов, помноженных на определённые коэффициенты, характеризующие частотный спектр сигнала. В общем виде обработка сводится к преобразованию полученных коэффициентов. При обратном преобразовании происходит восстановление сигнала – реконструкция, которая и является конечным результатом обработки. Вейвлет-анализ позволяет оценить и разделить частоты, соответствующие дефектам и зашумляющим факторам. При декомпозиции сигнала получаем два вида коэффициентов:

- масштабные (коэффициенты аппроксимации), которые несут информацию о НЧ составляющей изображения: грубой аппроксимации изображения при разных масштабах (уровнях) его представления;
- детализирующие (детальные коэффициенты), несущие информацию о ВЧ составляющей изображения: мелких деталях контраста на анализируемых масштабах (уровнях).

В случае двумерного сигнала имеем набор из трёх видов детальных коэффициентов: горизонтальных, вертикальных и диагональных, которые передают особенности контраста, ориентированные в указанных направлениях, т.е. в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлениях.

Рассмотрим результат высокочастотной (ВЧ) фильтрации на примере поляризационно-оптического контраста монокристаллического 6H-SiC, представленного на рис. 1.28 и содержащего области с различной фоновой неоднородностью. С учетом размера изображения максимальный уровень декомпозиции выбран равным 10 ($j=10$). Следовательно, полный частотный спектр изображения также укладывается в пределах 10 уровней. В ка-

честве базиса разложения (базисной функции) возьмем вейвлет Симлета с начальным масштабом функции, равным 8.

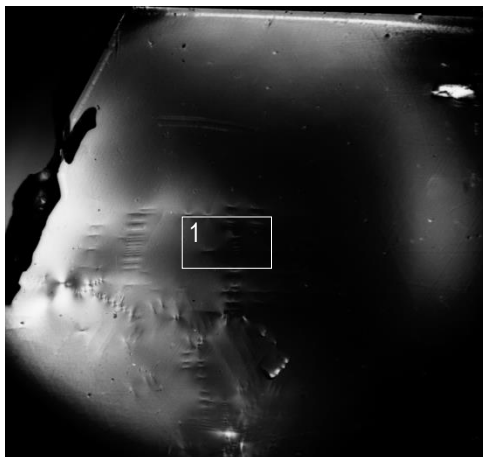


Рис. 1.28. Поляризационно-оптическое изображение монокристалла 6H-SiC

Устранение фоновой неоднородности можно осуществить тремя ранее предложенными методиками вейвлет-обработки [40, 120, 153–155, 160–163].

Первая методика. Устранение фоновой неоднородности достигается обнулением на этапе реконструкции масштабных коэффициентов. В реконструкции участвуют только детализирующие коэффициенты определённого набора верхних уровней разложения. Проводится ВЧ фильтрация детальных вейвлет-коэффициентов, при этом на разных частотах удастся выявить особенности изображения и ранее не регистрируемые детали розеток интенсивности. Диапазон уровней, участвующих при реконструкции изображения, формирует полосу пропускания ВЧ фильтра. Недостатком методики является сравнительно большое время обработки (90–100 с) и наличие явления элайзинга – флуктуации интенсивности (рис. 1.29) [40, 120, 153–155, 160, 163]. Устранение элайзинга и значительное уменьшение времени цифровой обработки достигается применением второй методики.

Вторая методика. Разработана и апробирована в данной работе и существенно отличается от первой. Она включает в себя 4 этапа, рис. 1.29 [120, 160–163].

На первом этапе на всех уровнях декомпозиции обнуляются детализирующие коэффициенты, а не масштабные. По мере увеличения уровня декомпозиции теряются ВЧ детали изображения и преобладает НЧ информация. Подбирая оптимальный уровень декомпозиции, а это, как правило, последние уровни, при реконструкции получаем обработанное изображение, содержащее информацию только о фоновой неоднородности.

На втором этапе вычитанием двух изображений друг из друга получаем разностный контраст (РК): первое – исходный контраст, второе – контраст, полученный на первом этапе и содержащий только фоновую неоднородность. Для различных уровней декомпозиции наблюдается элайзинг, зависящий от выбранного уровня декомпозиции.

На третьем этапе, к полученному на втором этапе РК применяем гаусс-размытие, радиус 10–80 пикселей (подбирается экспериментально).

На четвертом этапе строится результирующий РК между размытым и РК, полученным на втором этапе, и проводится коррекция его динамического диапазона. Полученный РК имеет более высокое качество и хорошую проработку основных деталей контраста при практически полном подавлении явления элайзинга. Время цифровой обработки в 10–12 раз меньше, чем по первой методике и третьей методикам, которая будет рассмотрена ниже. К основным достоинствам второй методики устранения фоновой неоднородности можно отнести уменьшение времени обработки при сохранении высокого качества обработанного изображения и устранение элайзинга. Аналогичный результат был получен и при вейвлет-обработке топографического контраста, содержащего фоновую неоднородность.

Применив к первой методике два последних этапа второй, можно также добиться устранения явления элайзинга.

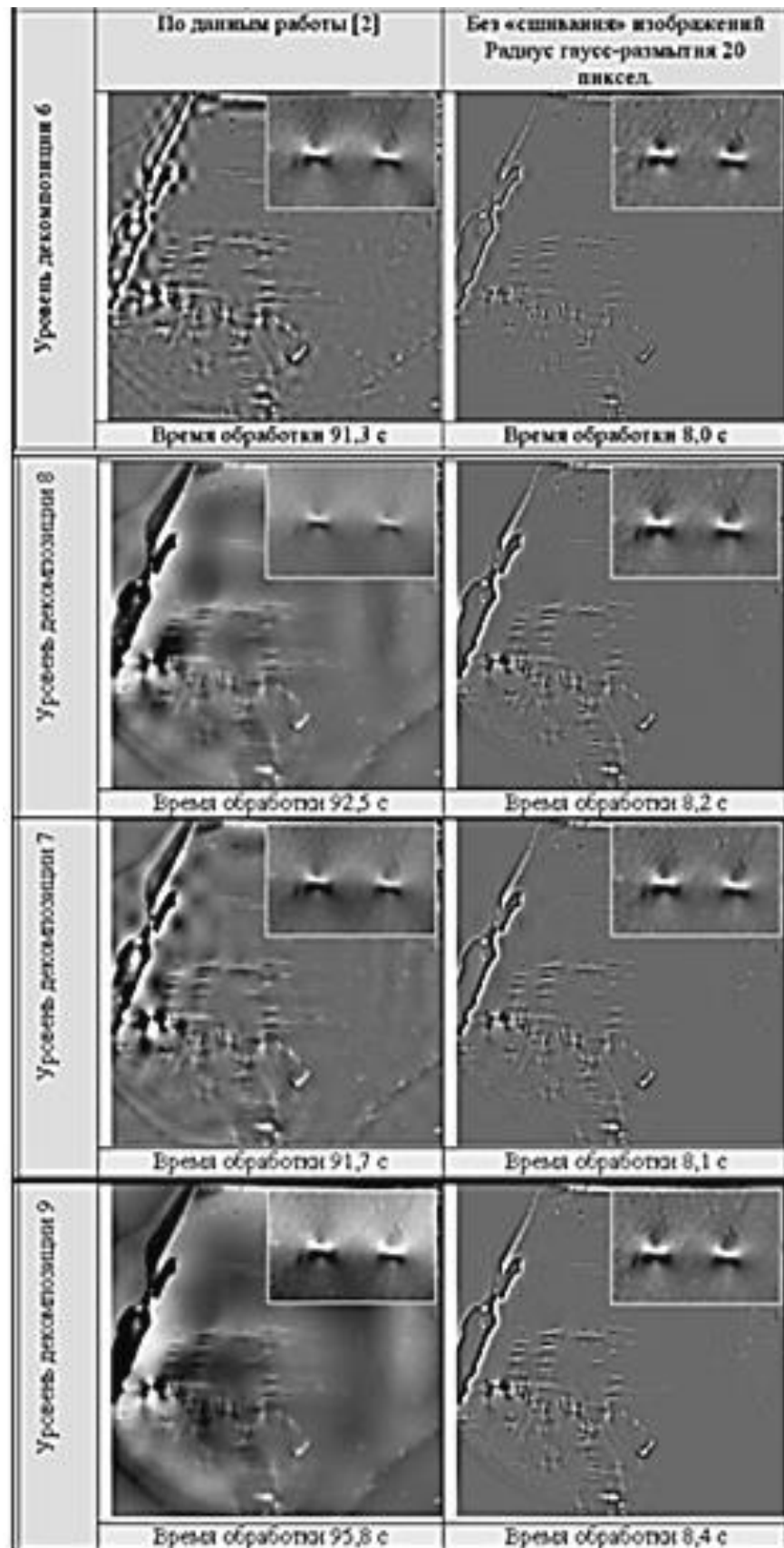


Рис. 1.29. Результат вейвлет-обработки поляризационно-оптического изображения монокристалла 6H-SiC по первой и второй методикам для различных уровней декомпозиции

Третья методика используется в том случае, когда первая и вторая не дают полной проработки деталей контраста в сильно затемненных или засветленных областях. Последовательность цифровой обработки при этом следующая (рис. 1.30) [40, 120, 154, 160, 162, 163].

1. Проводится гамма-коррекция исходного контраста: затемненные области преобразуются в более светлые ($\gamma = 0,3$, рис. 1.30, б), а засветлённые – в более темные ($\gamma = 3$, рис. 1.30, в). Для каждого контраста значения γ подбирается индивидуально.

2. Проводится вейвлет-обработка контрастов по первой методике (рис. 1.30, г).

3. При реконструкции контраста на уровне матриц проводится «сшивание» трех изображений и выбор оптимального уровня декомпозиции (рис. 1.30, д).

4. Для устранения явления элайзинга можно применить для контраста, полученного после «сшивания», два последних этапа второй методики, (рис. 1.30, е).

Суть данной методики заключается в следующем. ВЧ детали анализируемого контраста передаются на верхних уровнях большими значениями детальных коэффициентов. Амплитуда коэффициентов НЧ деталей на этих уровнях несопоставимо меньше. В результате чего можно совмещать в области детальных коэффициентов различные участки изображений, предварительно усилив в них ВЧ контраст. В дальнейшем объединяются детальные коэффициенты исходного и усиленного участков, в ходе которого большие по амплитуде коэффициенты заменяются меньшими по амплитуде. Таким образом, происходит замена прежних НЧ деталей участка новым усиленным ВЧ контрастом. На конечном этапе обработки происходит ВЧ фильтрация объединённых коэффициентов.

Предложенный алгоритм вейвлет-обработки позволяет устранить фоновую неоднородность изображения и совместить между собой его отдельные участки, различающиеся степенью усиления контрастности.

Время цифровой обработки по третьей методике по сравнению с первой увеличивается при использовании компьютера средней мощности на 30–40 % и составляет, примерно, 120–140 с, а в случае необходимости устранения элайзинга возрастает до 140–160 с.

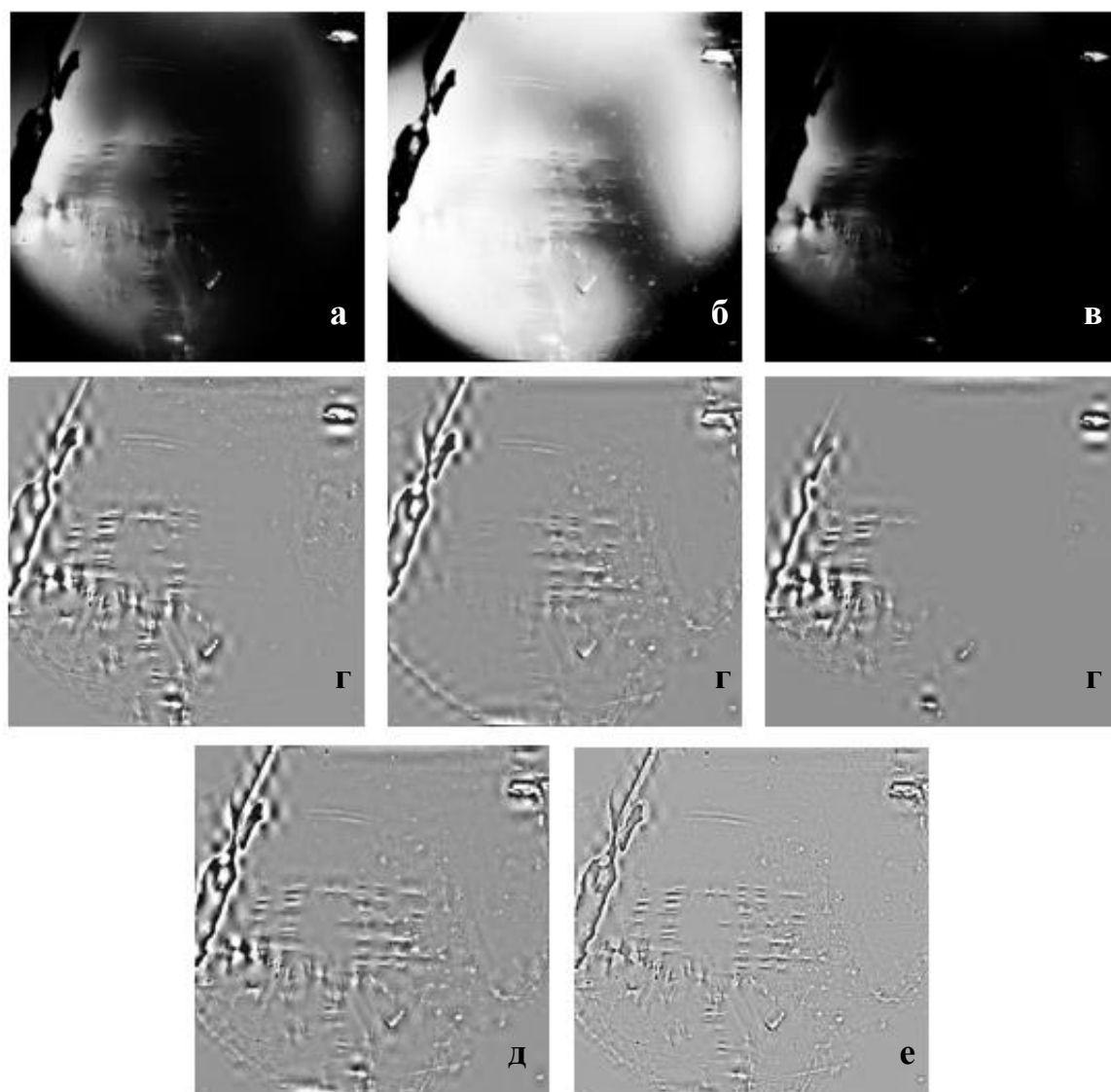


Рис.1.30. Вейвлет-обработка поляризационно-оптического контраста монокристалла 6H-SiC по третьей методике: а – исходный; б и в – исходный с коррекцией контрастности; г – вейвлет-обработка контраста для полосы пропускания, ограниченной снизу δ уровнем декомпозиции; д – результат «сшивания» трех контрастов, представленных на рис. г; е – контраст после подавления явления элайзинга

1.11. Устранение зернистости экспериментального контраста

Зернистость в большей степени присуща топографическому контрасту, и ее устранение на практике является более сложной задачей.

Экспериментально установлено, что при цифровой обработке обзорных топограмм контраст от зерна преобладает на 1–6 уровнях. Контраст дефектов имеет широкую частотную полосу от максимально низких частот до средних частот: от 7–9 до 3–4 уровней. Детали лепестков розеток интенсивности проявляются до 7–9 уровня, а ядра розеток – до 3 уровня. На низких частотах лежат слабоинтенсивные протяжённые детали розеток, позволяющие определить границы полей деформаций от дефектов. На средних и в некоторых случаях высоких частотах находятся высокоинтенсивные центральные детали дефектов, формирующие ядро розеток. Для сохранения полной картины изображения дефектов необходимо при НЧ фильтрации учесть все занимаемые полосы на разных конечных уровнях разложения. Для этого необходимо варьировать частотную характеристику фильтра не только сверху, изменяя вышестоящий уровень, ограничивающий полосу фильтрации, но и снизу, изменяя конечный уровень разложения. Это расширяет возможности выявления дополнительных особенностей контраста. Объединив далее результаты НЧ фильтрации для разных полос пропускания в единую картину фильтрации, получаем обработанный контраст с устраненным зерном, содержащий более полную информацию о структурном совершенстве исследуемого монокристалла.

Яркость розеток для всех используемых передаточных характеристик фильтров превосходит яркость зерна. На уровне вейвлет-коэффициентов это означает, что значения коэффициентов, передающих детали розеток, превосходят по абсолютной величине значения коэффициентов, содержащих детали зерна фотоэмульсии, т. е. на всех рассматриваемых полосах пропускания доминируют частоты, принадлежащие деталям дефектов. На частотах выше данных полос пропускания преобладают детали фоновой зернистости, и коэффициенты, передающие контраст от ро-

зеток, близки к нулю. Можно отфильтровать каждое НЧ изображение (матрицу), исключив из него значения коэффициентов, принадлежащих зерну, и сохранив значения коэффициентов, содержащих детали розеток. Коэффициенты, которые равны или меньше данных порогов, передают фоновую зернистость и приравниваются к среднему значению для коэффициентов каждой НЧ матрицы, а коэффициенты выше порога остаются без изменений, так как содержат в себе детали розеток.

Для этого на исходном изображении выделяем область, которая содержит только фоновую зернистость. Эта область используется в дальнейшем как отдельное входное изображение и является опорным для последующей фильтрации. Для каждой полученной НЧ матрицы вычисляются максимальное положительное и максимальное отрицательное значения вейвлет-коэффициентов. Данные величины используются как пороги нелинейной фильтрации. Опорная область не должна содержать очевидные или предполагаемые лепестки розеток или участки фоновой неоднородности, так как после НЧ-фильтрации подобные участки опорного изображения передаются коэффициентами большей величины, сопоставимой с коэффициентами самих дефектов, следовательно, после нелинейной фильтрации вместе с деталями зерна могут быть удалены и полезные составляющие розеток.

Эффективность устранения зернистости зависит от правильного выбора вейвлет-базиса и масштаба представления изображений дефектов. Оптимальными являются вейвлет-базисы с максимальной гладкостью функции и длиной КИХ-фильтра, т.к. они обладают наилучшим пространственным разрешением на низких частотах. Результаты обработки для трёх вейвлетов – Коифлета, Добеши и Мейера при различных масштабах контраста приведены на рис. 1.31. В случае более крупного масштаба представления дефектов (фрагмента топограммы) выявляется ряд дополнительных деталей, не выявляемых в случае обработки полной топограммы, это повышает в целом надёжность идентификации [40, 42].

Надежность выявления тонких особенностей экспериментального контраста повышается при использовании изображений с расширенным динамическим диапазоном (High Dynamic Range, HDR), т.е. изображений 32-битного формата.

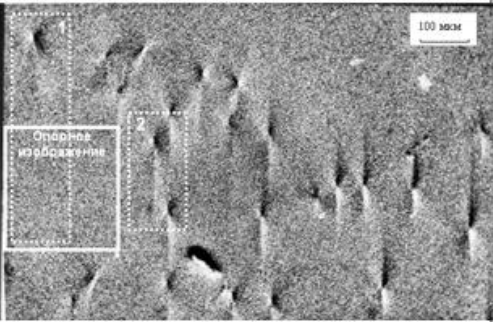
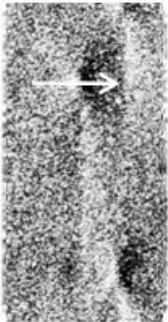

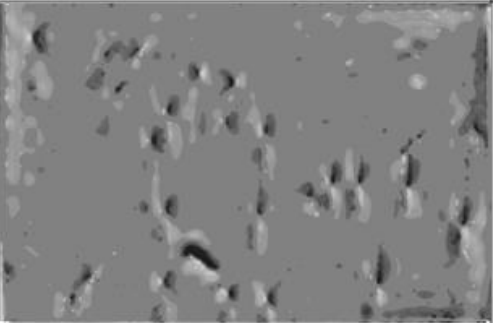
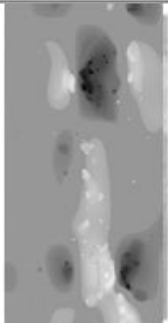

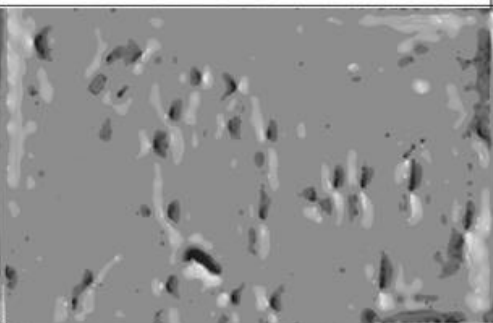
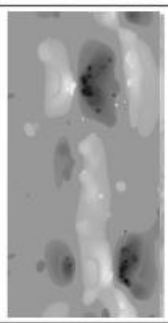

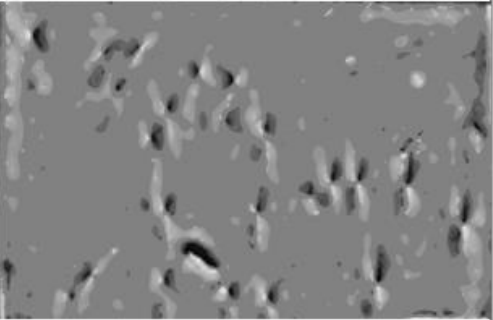
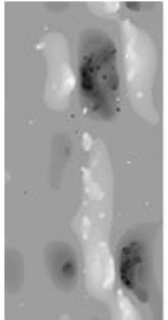

Тип вейвлет-базиса	Вейвлет-обработке топограммы монокристалла 6H-SiC, полученной методом РТБ	Вейвлет-обработка фрагментов топограммы 6H-SiC с изображением отдельных дислокаций	
Исходное изображение			
Вейвлет Конфлета с гладкостью функции 10			
Вейвлет Добеши с гладкостью функции 10			
Дискретный вейвлет Мейера			

Рис. 1.31. Устранение зернистости топографического контраста монокристалла 6H-SiC

Идея очень проста – описывать световые характеристики пикселя, формирующего изображение, реальными физическими величинами (цвет и интенсивность) [164].

Для формирования HDR-изображения с одинаково проработанными областями низкой и высокой интенсивности требуется очень большой диапазон яркостей, который можно получить только с помощью суперпозиции нескольких снимков с разным значением экспозиции (брекетинг). Желательно выбирать такие значения экспозиции, которые дают набор снимков с хорошей проработкой деталей в областях высокой и низкой интенсивности. Для решения поставленной задачи, т.е. получения топограмм с высоким динамическим диапазоном, применяется съёмка нескольких экземпляров одного и того же кадра с различными значениями экспозиции.

Сравнение данных таблицы 1.3 и результата вейвлет-обработки топографических изображений со скоплениями краевых дислокаций (рис. 1.32 и рис. 1.33) свидетельствует в пользу HDR-изображений. Применяемые для математической обработки экспериментального контраста программные пакеты работают только с 8- и 16-битными изображениями, поэтому HDR-изображения, имеющие 32-битный формат, необходимо сохранять в 8- или 16-битном формате.

Таблица 1.3

Параметры, характеризующие динамический диапазон исходных 8-битных изображений, использованных для получения топографических HDR-изображений.

Изображение	Средне-квадратическое отклонение	Средняя яркость пикселей	Динамический диапазон
8-бит	23,82	125,08	140
8-бит	23,82	125,66	150
8-бит	19,53	115,09	110
8-бит	17,85	105,08	120
HDR-изображения	46,84	157,25	230

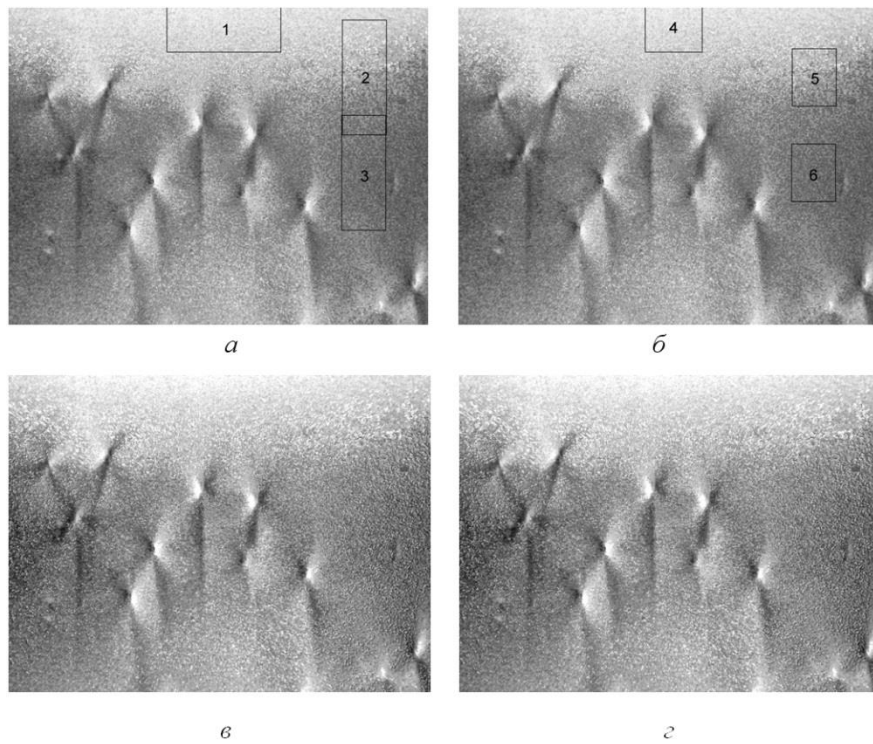


Рис. 1.32. Топограммы монокристалла 6H-SiC с различным яркостным разрешением: 8 бит (а), 16 бит (б), 32 бита с 8-битным сжатием (в), 32-бита с 16-битным сжатием (г)

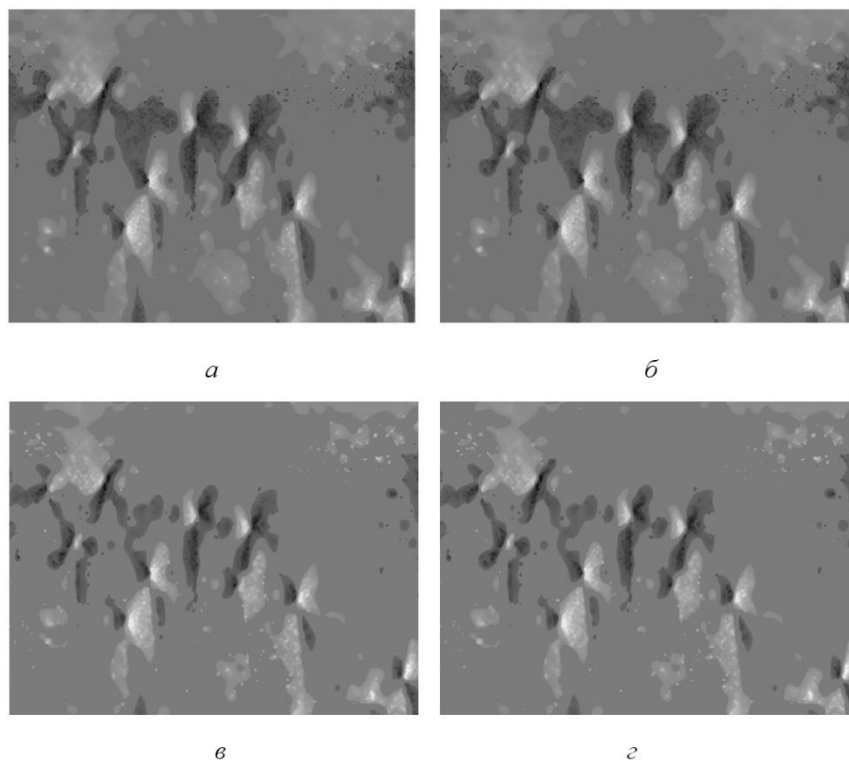


Рис. 1.44. Вейвлет-обработки контраста, представленного на рис. 1.32: а – разрешение 8 бит, б – разрешение 16 бит, в – HDR-контраст (8-битное сжатие), г – HDR-контраст (16-битное сжатие)

1.12. Выводы и постановка основных задач диссертационного исследования

Обзор теоретических и экспериментальных результатов, представленный в данной главе, показывает, следующее.

1. В физическом материаловедении рентгеновская топография и поляризационно-оптический анализ и на сегодня остаются эффективными и широко применяемыми диагностическими методами анализа дефектов структуры монокристаллов.

2. Метод РТБ имеет ряд особенностей, существенно выделяющих его на фоне других методов рентгеновской топографии.

– Обладая высокой чувствительностью, характерной для методов секционной топографии (СТ) и плоскостной топографии (ПВТ), он гораздо более прост в реализации. Контраст от дефектов кристаллической решетки в методе РТБ менее вариативен и позволяет, в отличие от других топографических методов, создать атлас экспериментальных изображений дефектов, упрощающий интерпретацию топограмм.

– Метод эффективно применим для анализа всех типов дефектов – квазиточечных (микродефектов), линейных (дислокаций), плоскостных (дефектов упаковки) и трехмерных (в том числе, макрополей деформаций различной природы).

– Контраст от микродефектов в методе РТБ более информативен, чем в методе Ланга. Изображение микродефекта в методе РТБ не осциллирует при изменении глубины расположения дефекта в кристалле, как в методах СТ и ПВТ, что позволяет без трудоемких расчетов однозначно и точно определить расположение и природу дефектов.

– При анализе дислокаций метод обладает более высокой достоверностью, чем использование критерия «погасаний» изображений дислокаций на различных рефлексах, и позволяет по единственному изображению в виде розетки контраста интенсивности определить все основные количественные характеристики дислокаций: кристаллографическое направление

оси, направление, знак и величину вектора Бюргерса.

- Путем анализа типов частичных дислокаций, входящих в состав простых и сложных дефектов упаковки, возможно определение природы дефектов упаковки.

- Большой размер изображений дефектов, определяемый чувствительностью метода, дает большую эффективность использования различных методов и подходов цифровой обработки экспериментальных изображений, которые позволяют получить новую качественную и количественную информацию о контрасте и формирующих его дефектах.

- Сравнительно малое распространение метода РТБ до настоящего времени объясняется трудностями интерпретации экспериментального контраста, которые в настоящее время сняты, благодаря использованию методики моделирования контраста по модифицированным Л.Н. Данильчуком уравнениям Инденбома–Чамрова и разработанных подходов для обработки экспериментальных изображений.

3. Поляризационно-оптический анализ (метод фотоупругости) является простым и достаточно экспрессным методом исследования материалов, обладающим развитой теорией.

4. Основными зашумляющими факторами, затрудняющими расшифровку экспериментального контраста и идентификацию дефектов структуры, являются слабая контрастность, фоновая неоднородность и зернистость экспериментальных изображений.

5. Эффективное устранение зашумляющих факторов и повышение качества экспериментального контраста достигается его цифровой обработкой, которая может быть основана на анализе яркостных и частотных характеристик.

6. Цифровая обработка, основанная на дискретном вейвлет-анализе – разновидности частотного анализа, является наиболее перспективной и позволяет выявлять «тонкие» особенности изображений дефектов структуры.

7. Эффективность цифровых методов повышается при получении и цифровой обработке HDR-изображений.

8. Применение цифровых методов повышает надежность и информативность рентгеновских и оптических методов, расширяет их возможности.

9. Топо-томография позволяет получить объемное изображение исследуемого монокристалла и является перспективным диагностическим методом исследования монокристаллических материалов и идентификации структурных дефектов.

10. Расшифровка экспериментального контраста, сравнение эффективности различных методов цифровой обработки или вейвлет-базиса проводится специалистом визуально, поэтому время и надежность идентификации дефектов структуры в значительной степени зависит от остроты его зрения, опыта работы и квалификации, т.е. носит в значительной степени субъективный характер.

Отсюда вытекает необходимость разработки простых и объективных количественных критериев оценки качества изображений, результатов цифровой обработки, вносимых ею искажений и потери полезной информации, не зависящих от субъективного взгляда специалистов, по-разному оценивающих и расшифровывающих тот или иной экспериментальный контраст.

Таким образом, можно сформулировать ряд задач, которые должны быть решены при выполнении данного диссертационного исследования.

1. Разработка новых подходов и методов цифровой обработки, повышающих надёжность идентификации дефектов структуры монокристаллов и разделения близко расположенных дефектов структуры различного типа.

2. Разработка для любого анализируемого экспериментального контраста простых количественных критериев оценки эффективности цифровой обработки, выбранного метода и выбора оптимального

вейвлет-базиса.

3. Оценка искажений и потери полезной информации при цифровой обработке экспериментального контраста.

4. Апробирование разработанных методик качественного и количественного анализа на диагностику и исследование веществ и материалов различной физико-химической природы, а также контроль технологических процессов.

ГЛАВА 2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТОПОГРАФИЧЕСКИХ И ПОЛЯРИЗАЦИОННО–ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ

2.1. Моделирование основных зашумляющих факторов топографического и поляризационно–оптического контрастов

К основным способам идентификации дефектов структуры монокристаллов, регистрируемых методами топографии и поляризационно–оптического анализа, относятся:

- сопоставление анализируемых экспериментальных изображений с ранее расшифрованными;
- сопоставление экспериментальных изображений с теоретически рассчитанными.

Для экспериментальных топограмм и фотоснимков, как уже отмечалось выше, характерно наличие «зашумляющих» факторов: слабой контрастности, фоновой неоднородности и зернистости изображений, дефектов фотоэмульсии.

Основная сложность расшифровки рентгеновских топограмм заключается в выявлении особенностей изображений дефектов на фоне высокой зернистости (гранулярности) фотоэмульсии и фоновой неоднородности. Размер зёрен изображения сопоставим по порядку величины с дифракционными изображениями дефектов монокристалла. В силу особенностей топографических методов переход от фотографического к другим методам регистрации не приводит к решению проблемы. Для поляризационно–оптических исследований наиболее существенным зашумляющим фактором является сильная фоновая неоднородность.

Выявление качественных и количественных особенностей экспериментального контраста, формируемого дефектами структуры, достигается цифровой обработкой экспериментальных топограмм и фотоснимков, проводимой с целью устранения основных «зашумляющих» факторов и по-

вышения их качества.

Даже, используя цифровую обработку контраста, в некоторых случаях не удаётся достаточно точно определить количественные характеристики дефектов, например, угол, под которым дислокации расположены в кристалле, и глубину залегания микродефекта.

Другим возможным подходом расшифровки экспериментального контраста и идентификации дефектов является приближение теоретически рассчитанных изображений к экспериментальным с помощью моделирования «зашумляющих» факторов [65, 66, 165].

При моделировании теоретического контраста точно задаются основные параметры дефектов структуры, включая и их расположение в объеме монокристалла. Смоделировав основные «зашумляющие» факторы изображения и варьируя параметрами моделирования, можно получить теоретический контраст, максимально приближенный к экспериментальному. Зная заложенные при моделировании параметры, можно надёжно расшифровать экспериментальный контраст и идентифицировать дефект структуры, включая и его расположение в объёме монокристалла. Применяя цифровую обработку экспериментального и зашумленного теоретического контраста, подогнанного под экспериментальный, можно проверить правильность идентификации дефекта структуры. Критерием правильности служат одинаковые по виду обработанные контрасты (экспериментальный и зашумленный теоретический). В случае необходимости всегда есть возможность взять другое теоретическое изображение, и провести его зашумление и цифровую обработку.

Напомним, что в методе РТБ и фотоупругости дефекты структуры имеют вид розеток интенсивности, форма и количество лепестков которых зависят от типа дефекта и его расположения в объеме монокристалла, а его размеры от исследуемого материала. В качестве примера на рис. 2.1 для монокристалла 6H-SiC приведены теоретически рассчитанные изображения краевых дислокаций, наклонённых под различными углами к поверх-

ности кристалла в плоскости, перпендикулярной плоскости рассеяния рентгеновских лучей ($\vec{b} \perp \vec{g}$).

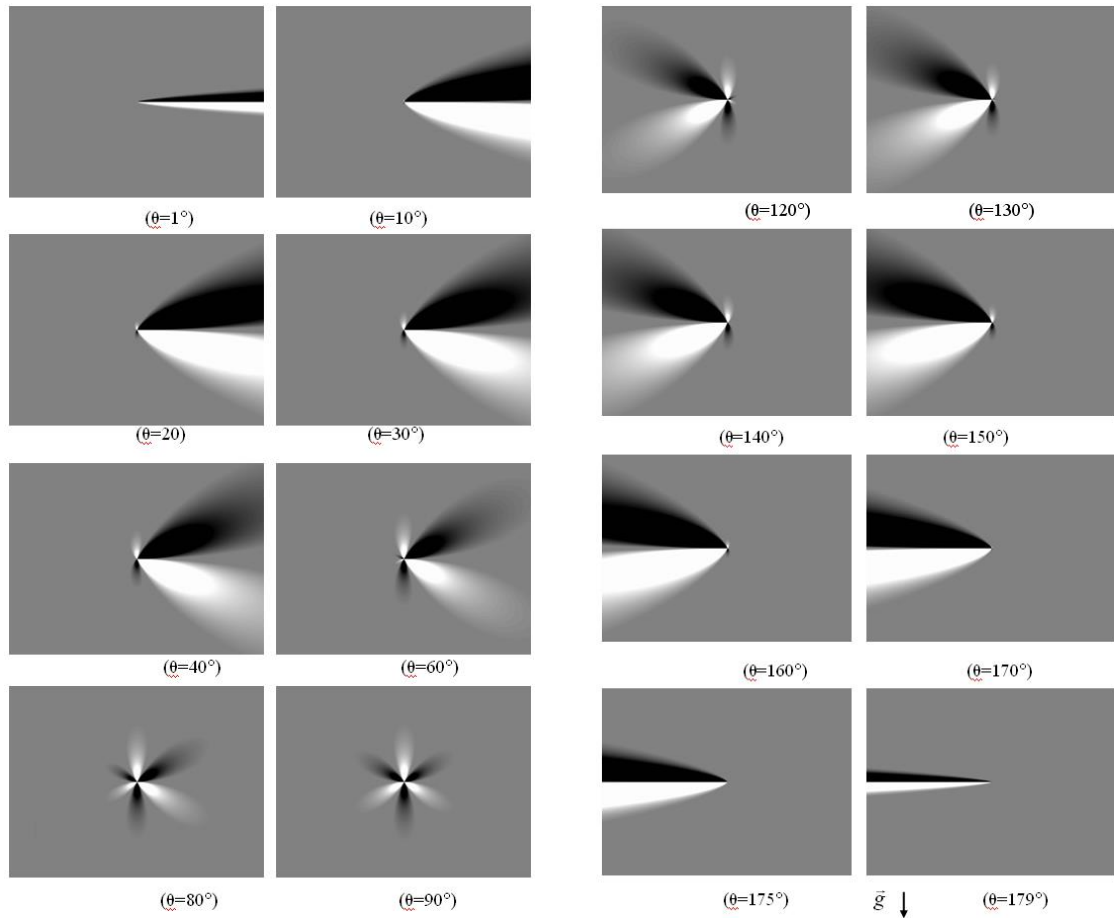


Рис.2.1. Теоретически рассчитанные изображения краевых дислокаций, наклонённых под различными углами к поверхности кристалла в плоскости, перпендикулярной плоскости рассеяния рентгеновских лучей ($\vec{b} \perp \vec{g}$)

Алгоритм метода наложения шума основан на использовании функции генерирования чисел случайным образом и суммировании шума с исходным теоретически рассчитанным изображением.

Математическая модель шума выглядит следующим образом:

$$s2 = s1 + ((\text{Random}(10)/10) - (5/10)),$$

где $s1$ – значения исходного изображения без шума, $s2$ – значения исходного изображения с учётом шума, $(\text{Random}(10)/10) - (5/10)$ – функция генерирования шума, в которой $(\text{Random}(10)/10)$ – значение функции генериро-

вания чисел в диапазоне от 0 до 10, поделённое на 10, а $(5/10)$ – слагаемое, позволяющее сместить сгенерированный шум в отрицательную область для его симметричного наложения. Сгенерированный шум со случайным распределением симметрично добавляется к изображению в положительную и в отрицательную области (в сторону затемнения и осветления изображения). Подбирая параметры генерирования шума ($\text{Random}(10)/10$) и слагаемого смещения, добиваемся разной степени зашумлённости. Для максимального приближения зашумленного теоретического изображения к экспериментальному необходимо применить небольшое гаусс-размытие (радиус гаусс-размытия составляет 1–2 пикселя). Таким образом, данная методика позволяет смоделировать изображения дефектов, максимально приближенные к экспериментальным.

В качестве примера на рис. 2.2–2.4 представлены результаты рассмотренного выше подхода для винтовой дислокации.

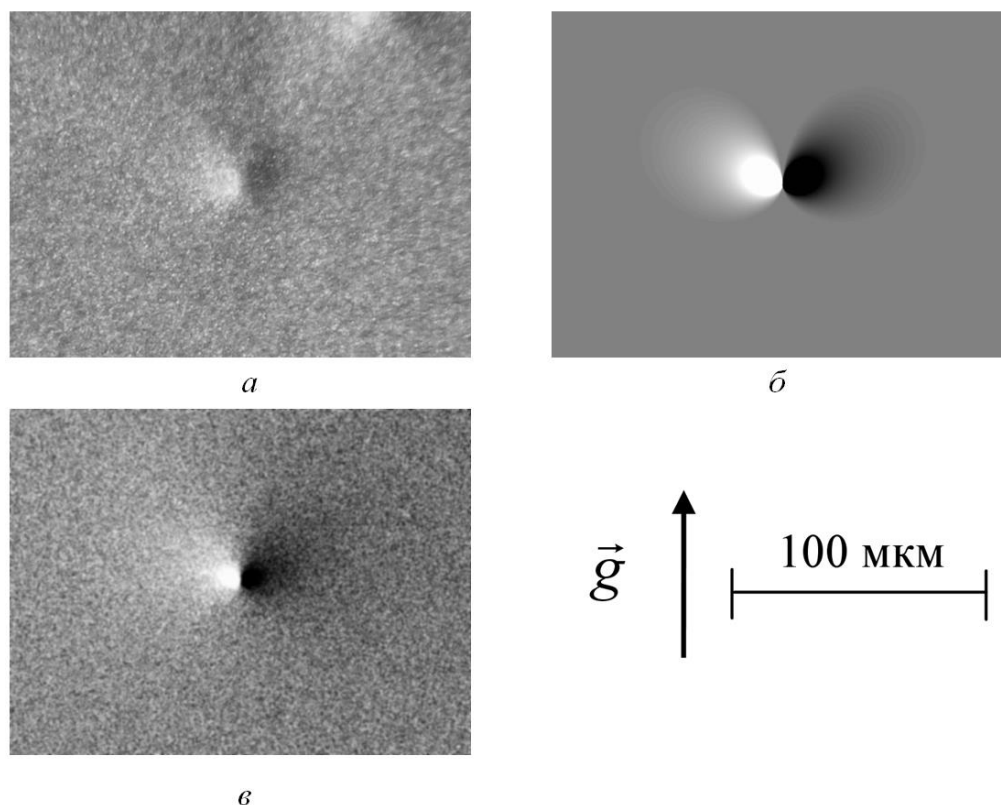


Рис.2.2. Изображения винтовой дислокации в монокристалле 6H-SiC: экспериментальное топографическое (а), теоретическое (б) и теоретическое с моделированным шумом (в)

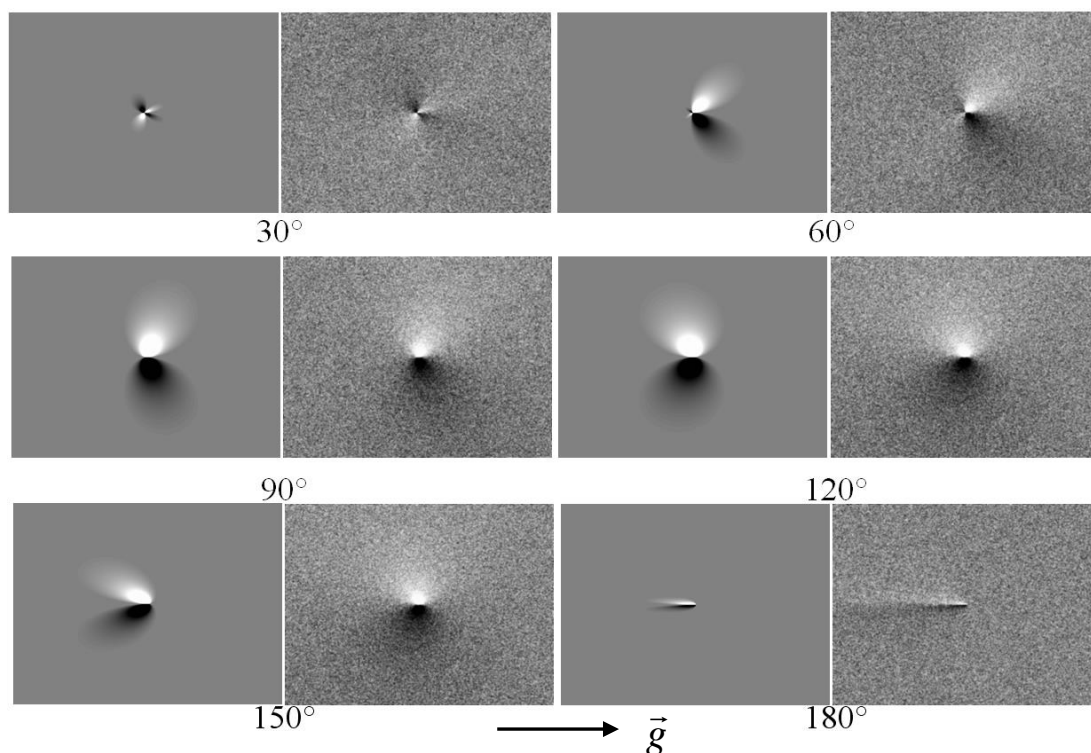


Рис.2.3. Теоретические изображения винтовых дислокаций без шума (слева) и с шумом (справа), лежащих под различными углами к поверхности в монокристалле SiC

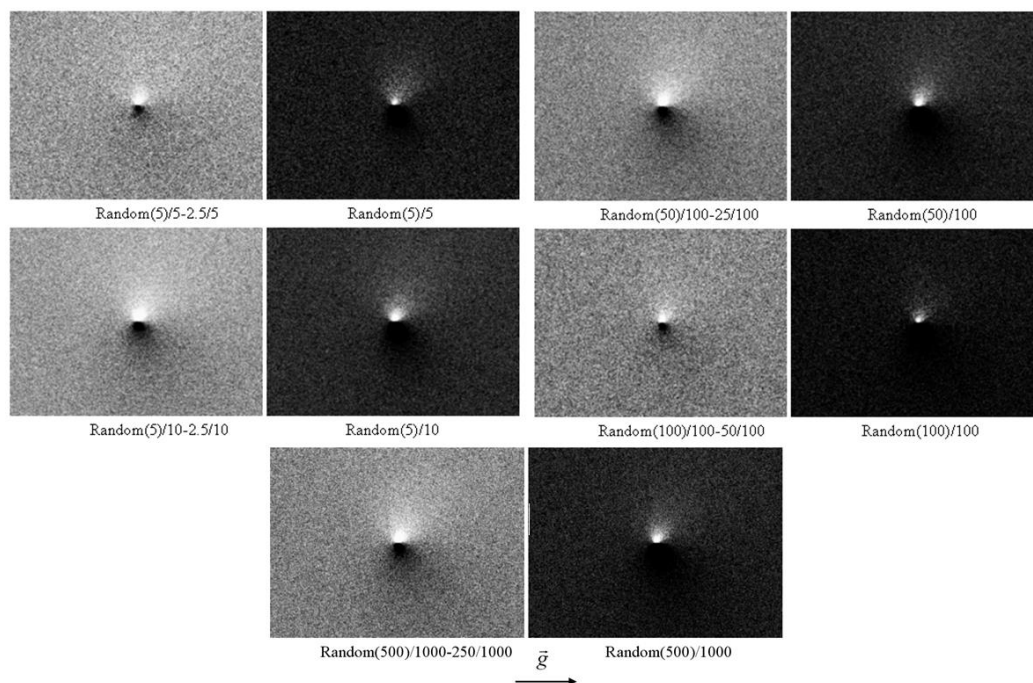


Рис.2.4. Теоретические изображения винтовой дислокации с симметричным распределением шума (слева) и с несимметричным распределением (справа), расположенной перпендикулярно поверхности монокристалла SiC, при различных параметрах генерирования шума

Описанный выше подход зашумления теоретического контраста дефектов различного типа будет необходим нам при рассмотрении одной из предложенных в данной работе методик количественной оценки качества экспериментального контраста.

2.2. Основные проблемы, решаемые введением количественных критериев

На практике анализ качества экспериментального контраста, формируемого дефектами структуры монокристаллов, и эффективность цифровой обработки проводится чисто визуально и в значительной степени зависит от квалификации специалиста, остроты его зрения и опыта. Таким образом, визуальная оценка носит выраженный субъективный характер. Несколько специалистов, анализируя один и тот же контраст, могут по-разному его интерпретировать и, соответственно, по-разному идентифицировать дефекты. Проблемы могут возникнуть и при выборе метода, и оценки результатов цифровой обработки, а также при выборе оптимального вейвлет-базиса. Различные цифровые методы и вейвлет-базисы могут давать близкие по качеству и неразличимые визуально обработанные изображения, но реально содержать при этом различия, связанные с регистрацией «тонких» особенностей экспериментального контраста.

В нашем случае главной задачей цифровой обработки является повышение качества и максимальное выявление особенностей экспериментального контраста, формируемого дефектами структуры различного типа, при минимальной потере и искажении полезной информации.

Для уменьшения влияния субъективного фактора необходимо выбрать простые количественные критерии, позволяющие объективно оценить качество и эффективность цифровой обработки, различие или идентичность анализируемых изображений [42, 103, 120, 166–187].

2.3. Количественные методики оценки качества изображений

Чтобы уйти от субъективности при оценке качества и выбора системы обработки изображения, необходимо проводить его сравнения с некоторым эталоном и ввести объективные количественные критерии.

2.3.1. Классификация методик оценки качества

Существующие методики оценки качества можно разделить на две большие группы: субъективные и объективные, рис. 2.5.

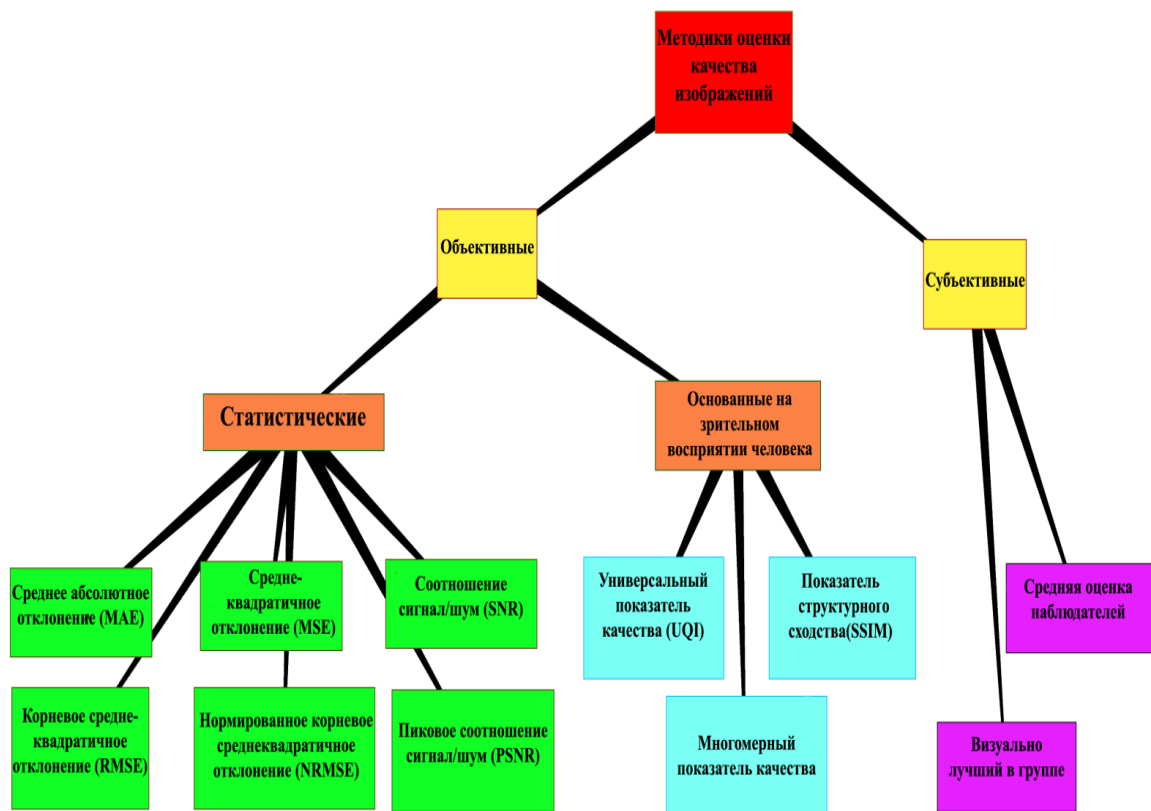


Рис. 2.5. Методики оценки качества изображений [188]

Субъективные методики используют для количественной оценки качества изображений зрительную систему человека. Наиболее эффективный метод субъективной оценки – средняя оценка наблюдателей.

К объективным методикам относятся математические модели, моделирующие результаты субъективной оценки качества и основанные на измеряемых объективно критериях и метриках. Объективная метрика не

учитывает особенности человеческого восприятия и классифицируется по трем категориям:

- полные референсные методы;
- сокращенные референсные методы;
- нереференсные методы.

Объективные методы требуют для определения параметров обработки повторения тестов (испытаний), приводящихся с обработанным сигналом. Это уменьшает скорость обработки, усложняет методы и делает их менее практичными. Поэтому, большинство исследований направлено на поиск новых методов объективной оценки качества, которые позволят предсказывать воспринимаемый уровень качества перед кодированием.

Ниже будут рассмотрены некоторые объективные методики оценки качества изображений: MSE, PSNR, SSIM.

2.2.2. Среднеквадратичное отклонение (MSE)

Среднеквадратичное отклонение или стандартное отклонение (Mean Squared Error) – статистический показатель рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания. Данная величина безразмерна и равна среднему квадратов ошибок (разностей интенсивности соответствующих пикселей) двух изображений: оригинального X и обработанного Y . MSE рассчитывается по формуле:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} (x_{i,j} - y_{i,j})^2, \quad (2.1)$$

где m – высота изображения в пикселях; n – ширина изображения в пикселях; mn – полное число пикселей в изображении; $x_{i,j}$ и $y_{i,j}$ – значения интенсивности соответствующих пикселей изображений X и Y .

Чем меньше значение MSE, тем ближе по качеству сравниваемые изображения.

2.2.3. Пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR)

Широкое применение получил метод оценки качества цифровых сигналов, основанный на определении отношения сигнала к шуму и пикового отношения сигнала к шуму между исходным сигналом и сигналом на выходе системы (Peak Signal-to-Noise Ratio). Однако низкое значение PSNR не всегда гарантирует хорошее качество [189].

Пиковое отношение сигнал/шум – соотношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего значения сигнала. Поскольку многие сигналы имеют широкий динамический диапазон, то PSNR измеряется по логарифмической шкале в децибелах.

Эта методика часто используется для измерения уровня искажений при сжатии изображений. Для монохромных изображений PSNR рассчитывается по следующей формуле:

$$PSNR = 10 \lg \frac{M^2}{MSE}, \quad (2.2)$$

где M – максимально возможное значение интенсивности, принимаемое пикселем изображения; MSE – среднеквадратичное отклонение.

Если значения сигнала представлены линейно с количеством бит на одно значение, равным B , то максимально возможное значение интенсивности пикселя можно рассчитать по формуле:

$$M = 2^B - 1, \quad (2.3)$$

Таким образом, для 8-битных изображений $M=255$.

PSNR, так же как и MSE, не имеет абсолютного значения. Величина пикового отношения сигнал/шум используется только для сравнения различных методик реставрации сигналов и для изучения влияния различных параметров на производительность того или иного алгоритма. Обычно величина PSNR варьируется в пределах от 20 до 40. Чем ближе обработанное изображение к оригинальному, тем выше значение данной метрики. Высокое значение PSNR означает только определенную схожесть обработанно-

го и исходного изображений, но не дает гарантии, что человеку восстановленное изображение покажется качественным.

2.3.4. Показатель структурного сходства SSIM

Показатель структурного сходства (Structural SIMilarity index) – методика измерения сходства двух изображений, относящаяся к полным референсным метрикам. Для измерения качества обработанного изображения необходимо наличие незашумленного и исходного изображений. Данная методика была разработана как замена метрик MSE и PSNR, не учитывающих особенности человеческого восприятия.

В отличие от MSE и PSNR расчет показателя структурного сходства основан не на попиксельном сравнении изображений, а на сравнении блоков пикселей определенного размера, как правило, это блоки 8×8 пикселей. Сравнение происходит по трем компонентам:

- сходности по яркости;
- по контрасту;
- структурному сходству.

Далее полученные значения объединяются в итоговый результат. Принцип измерения показателя структурного сходства представлен на рисунке 2.6.

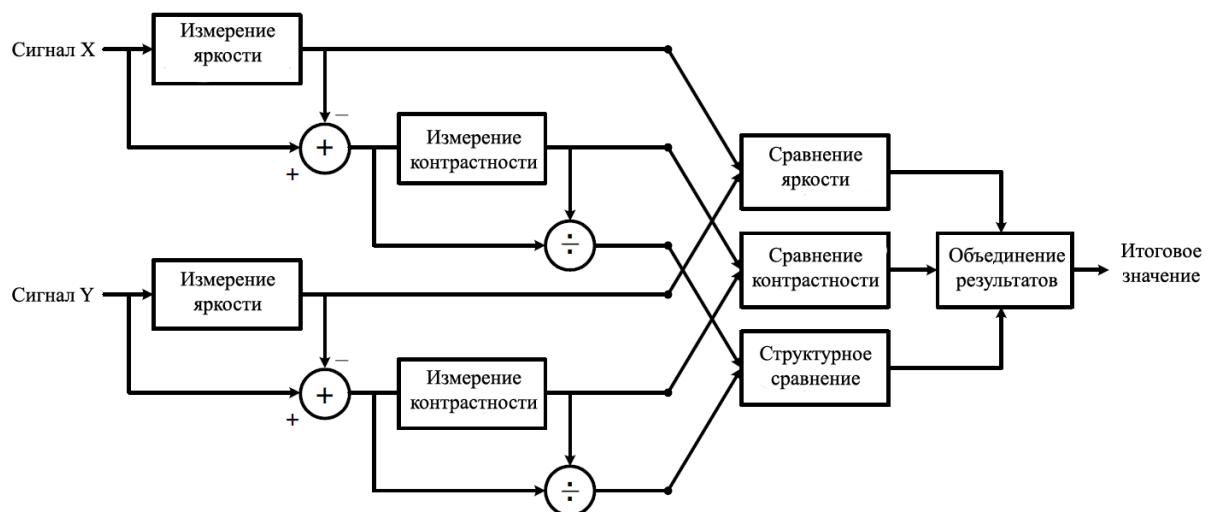


Рис. 2.6. Схема измерения показателя структурного сходства [190]

Итоговое значение показателя структурного сходства представляет собой функцию яркости, контрастности и структурной похожести:

$$SSIM(x, y) = f(l(x, y), c(x, y), s(x, y)), \quad (2.4)$$

где $S(x, y)$ – показатель структурного сходства;

$l(x, y)$ – показатель сравнения яркости (интенсивности);

$c(x, y)$ – показатель сравнения контрастности;

$s(x, y)$ – показатель структурного сравнения.

Первоначально вычисляется средняя интенсивность изображения (2.5) и значение контрастности (2.6).

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.5)$$

где N – общее число пикселей в изображении; x_i – значение интенсивности i пикселя.

$$\sigma_x = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.6)$$

Показатель сравнения интенсивности двух изображений рассчитывается по формуле:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad (2.7)$$

где μ_x и μ_y – значения средней интенсивности изображений X и Y соответственно; C_1 – константа, необходимая для исключения ошибок, при значении $\mu_x^2 + \mu_y^2$, близком к нулю.

Показатель сравнения контрастности двух изображений находится по формуле:

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad (2.8)$$

где σ_x и σ_y – значение контрастности изображений X и Y соответственно; C_2 – константа, необходимая для исключения ошибок, при значении

$\sigma_x^2 + \sigma_y^2$, близком к нулю.

Значение показателя структурного сравнения рассчитывается по формуле:

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x \sigma_y + C_3}, \quad (2.9)$$

где: C_3 – константа,

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y). \quad (2.10)$$

Подставляя значения выражений (2.7), (2.8) и (2.9) в выражение (2.4), получаем итоговую формулу для вычисления показателя структурного сходства:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (2.11)$$

Значения констант C_1 и C_2 для выражения (2.11) находятся по формулам:

$$C_1 = (K_1 L)^2, \quad C_2 = (K_2 L)^2, \quad (2.12)$$

где K_1 и K_2 – константы, равные 0,01 и 0,03 соответственно; L – максимальное возможное значение, принимаемое пикселем (для 8-битных изображений $L=255$).

Результат измерения SSIM располагается в диапазоне от минус 1 до плюс 1, где $SSIM=1$ означает, что изображения идентичны.

2.4. Применение метрик MSE, PSNR и SSIM для оценки качества восстановления зашумленного изображения

Оценим качество реставрации зашумленного изображения с помощью метрик PSNR, MSE и SSIM, используя в качестве примера теоретическое и теоретическое зашумленное изображения дефектов структуры. Реставрация изображения проводилась при помощи вейвлет-преобразований.

На рис. 2.7 представлены исходное не зашумленное и зашумленное теоретическое изображения краевой дислокации монокристалла 6H-SiC.

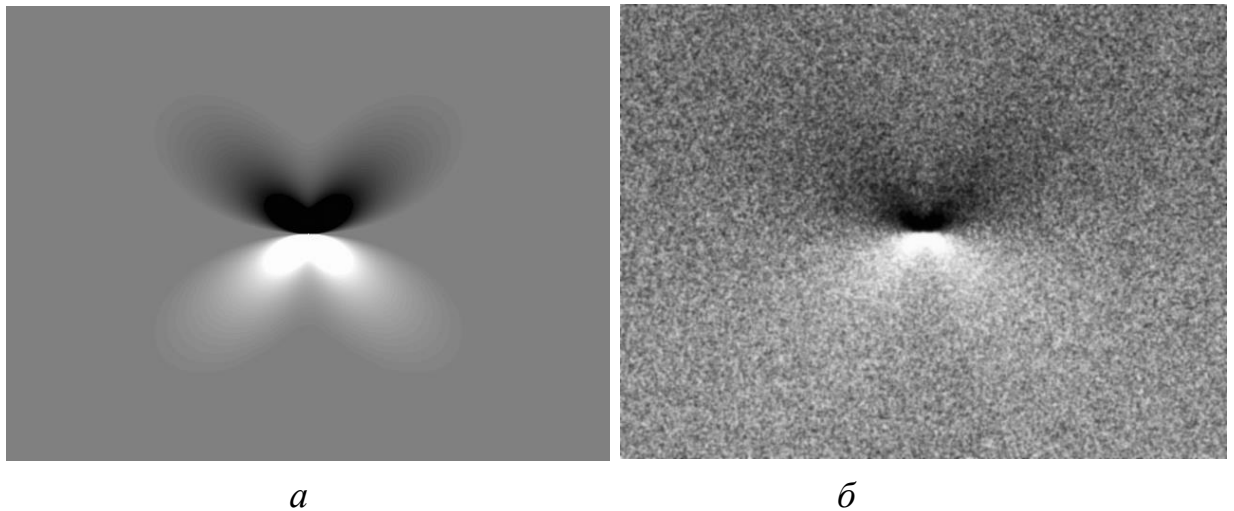


Рис. 2.7. Теоретическое изображение краевой дислокации в монокристалле 6H-SiC: а – не зашумленное, б – зашумленное

Восстановим зашумленное изображение с помощью вейвлетов Dmey и Sym8 с опорной областью 480x90. Полоса ограничена снизу и сверху уровнями 8–3. Результаты обработки зашумленного изображения вейвлетами Dmey и Sym8 представлены в таблице 2.1.

Результаты вычислений метрик MSE, PSNR и SSIM представлены в таблице 2.2. Метрика MSE принимает минимальное значение 73,028 при сравнении исходного изображения и изображения, обработанного вейвлетом Sym8 summa (3-8), при этом значение метрики PSNR достигает максимума (29,4959) при сравнении той же пары изображений. Можно сделать вывод: основываясь на метриках MSE и PSNR, наиболее качественный результат восстановления зашумленного изображения достигается при помощи вейвлета Sym8 summa с полосой пропускания 3-8. Для визуальной (субъективной) оценки качества цифровой обработки на рис. 2.8 представлены исходное (а) и обработанное данным вейвлетом зашумленное изображение (б).

С другой стороны, метрика SSIM оказалась максимальной (0,9571) для изображения, восстановленного при помощи вейвлета Dmey summa (3-7). На рис. 2.9 представлены для визуальной оценки качества восстановления исходное и обработанное вейвлетом Dmey зашумленное изображение.

Таблица 2.1

Результат вейвлет-обработки зашумленного изображения

L_1 L_2	Dmey summa	Dmey overlay	Sym8 summa	Sym8 overlay
3 – 4				
3 – 5				
3 – 6				
3 – 7				
3 – 8				

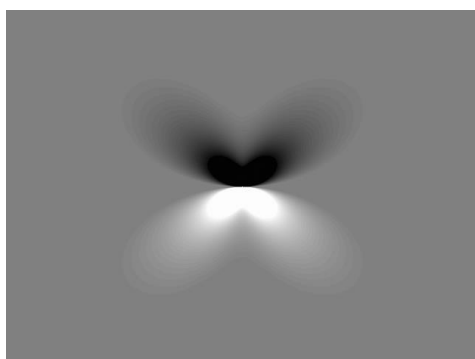
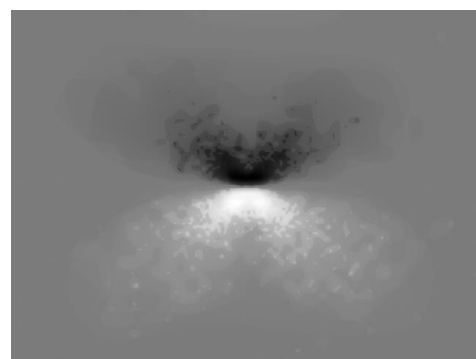
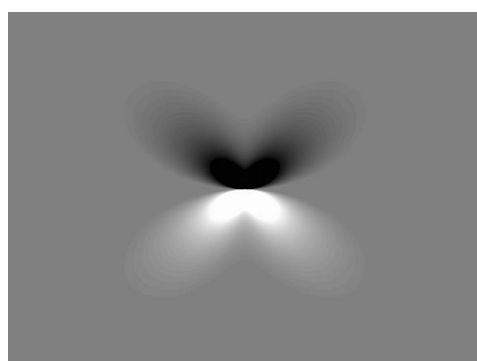
*а**б*

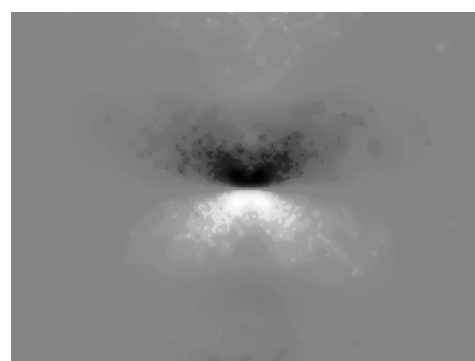
Рис. 2.8. Результат обработки: *а* – исходное изображение, *б* – восстановленное вейвлетом Sym8 summa (3-8) изображение краевой дислокации монокристалла 6H-SiC

**Результаты вычисления метрик MSE, PSNR и SSIM для
восстановленных изображений**

Обработанное изображение	MSE	PSNR	SSIM
Dmey summa (3-4)	262,6938	23,9363	0,9401
Dmey summa (3-5)	194,9144	25,2324	0,9447
Dmey summa (3-6)	111,6201	27,6534	0,9540
Dmey summa (3-7)	80,5342	29,0710	0,9571
Dmey summa (3-8)	88,1790	28,6772	0,9567
Dmey overlay (3-4)	176,2482	25,6696	0,9379
Dmey overlay (3-5)	120,8628	27,3079	0,9344
Dmey overlay (3-6)	128,1268	27,0544	0,9441
Dmey overlay (3-7)	137,4368	26,7498	0,9452
Dmey overlay (3-8)	146,1950	26,4815	0,9405
Sym8 summa (3-4)	192,1072	25,2954	0,9340
Sym8 summa (3-5)	182,1101	25,5275	0,9448
Sym8 summa (3-6)	209,6032	24,9168	0,9477
Sym8 summa (3-7)	95,2864	28,3405	0,9542
Sym8 summa (3-8)	73,0280	29,4959	0,9567
Sym8 overlay (3-4)	142,3848	26,5962	0,9276
Sym8 overlay (3-5)	103,5984	27,9773	0,9291
Sym8 overlay (3-6)	113,7682	27,5706	0,9376
Sym8 overlay (3-7)	119,0258	27,3744	0,9395
Sym8 overlay (3-8)	136,9708	26,7645	0,9372



а



б

Рис. 2.9. Результат обработки: а – исходное изображение, б – восстановленное вейвлетом Dmey summa (3-7) изображение краевой дислокации монокристалла 6H-SiC

Такой результат вызван особенностью алгоритма SSIM, поскольку он, в отличие от MSE и PSNR, учитывает наряду с яркостной характеристикой еще контрастную и структурную схожесть изображений.

Для восстановленного вейвлетом Dmey summa (3-4) изображения (рис. 2.10) метрика MSE принимает максимальное значение 262,6938, а PSNR – минимально значение 23,9363.

Для восстановленного вейвлетом Sym8 overlay (3-4) изображения (рис. 2.11) SSIM принимает минимальное значение – 0,9276. Это также связано с тем, что алгоритм расчета структурной схожести SSIM учитывает яркостную, контрастную и структурную схожесть изображенной, в то время, как MSE и PSNR при вычислении используют только значение интенсивности (яркости) каждого отдельного пикселя. На рис. 2.11 представлены исходное и обработанное вейвлетом Sym8 overlay (3-4) зашумленное изображение.

Из представленных выше рисунках 2.8–2.11 визуально (субъективно) оценить качество восстановления изображения очень сложно. Однако метрики оценки качества четко показывают наиболее и наименее качественные восстановление изображения.

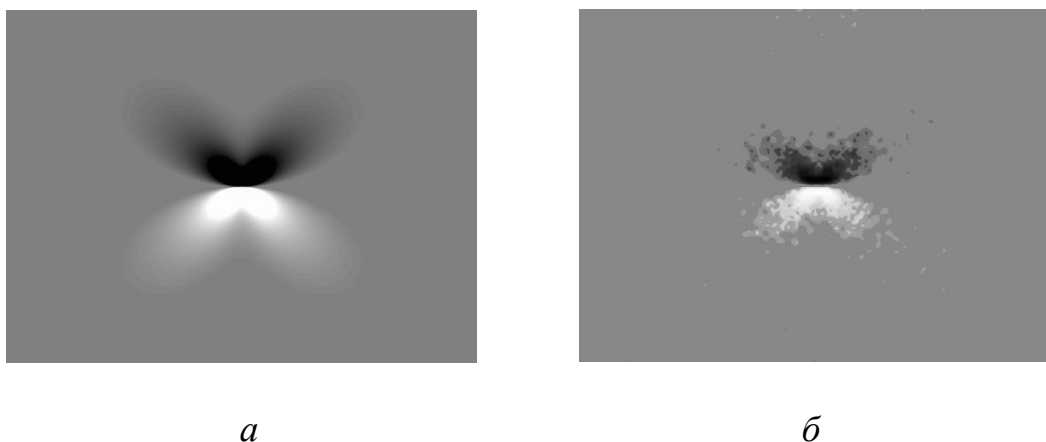


Рис. 2.10. Результат обработки: а – исходное изображение, б – восстановленное вейвлетом Dmey summa (3-4) изображение краевой дислокации монокристалла 6H-SiC

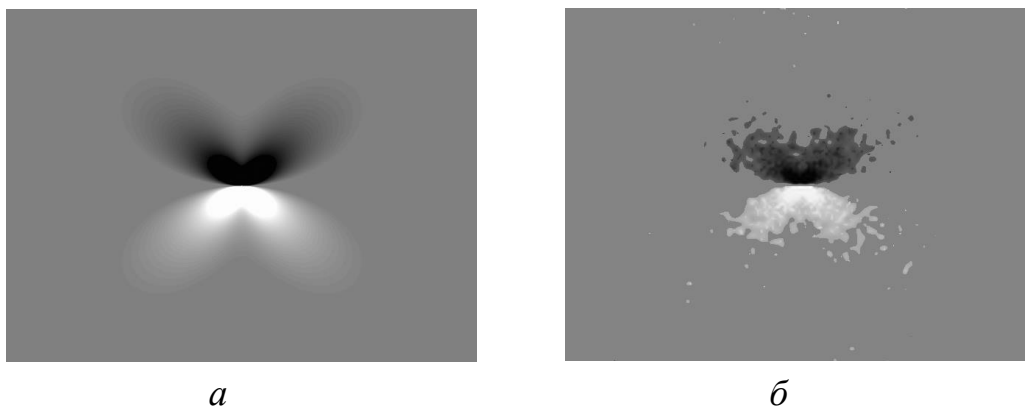


Рис. 2.11. Результат обработки: а – исходное изображение, б – восстановленное вейвлетом Sym8 overlay (3-4) изображение краевой дислокации монокристалла 6H-SiC

В ходе проведенных исследований установлено, что методика оценки качества по структурной схожести изображений SSIM является для топографических и поляризационно-оптических контрастов более перспективной по сравнению с PSNR и MSE. Причина – учет метрикой SSIM, яркостных, контрастных и структурных особенностей сравниваемых изображений.

2.5. Количественная оценка эффективности цифровой обработки изображений по их яркостным характеристикам

Рассмотрим иной подход количественной оценки качества цифровой обработки, который будет основан на анализе цветовых характеристик исследуемого контраста: построении яркостных характеристик, профилей интенсивности и разностного контраста. Как мы покажем ниже, этот подход является наиболее простым, экспрессным и легко технически реализуемым на практике [42, 103, 120, 166–187].

Применим к теоретическому контрасту (не зашумленному и зашумленному) цифровую обработку с использованием вейвлета Симлета с масштабом функции 8 (sym8) и вейвлета Мейера (dmeu). Сравним результаты цифровой обработки для следующих типов дефектов монокристалла 6H-

SiC:

- для краевой дислокации: дислокация системы скольжения $\{1\bar{1}00\}$ $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ с учётом поля поверхностной релаксации (рис. 2.12);
- правовинтовой дислокации: дислокация имеет ось $[0001]$ и вектор Бюргерса, равный высоте элементарной ячейки c (рис. 2.13);
- когерентного включения типа «вакансии»: случай расположения микродефекта на глубине $z=0$ мкм от поверхности кристалла, радиус включения сферической формы $r_0=10$ мкм, $\varepsilon = -1 \cdot 10^{-4}$ (рис. 2.14).

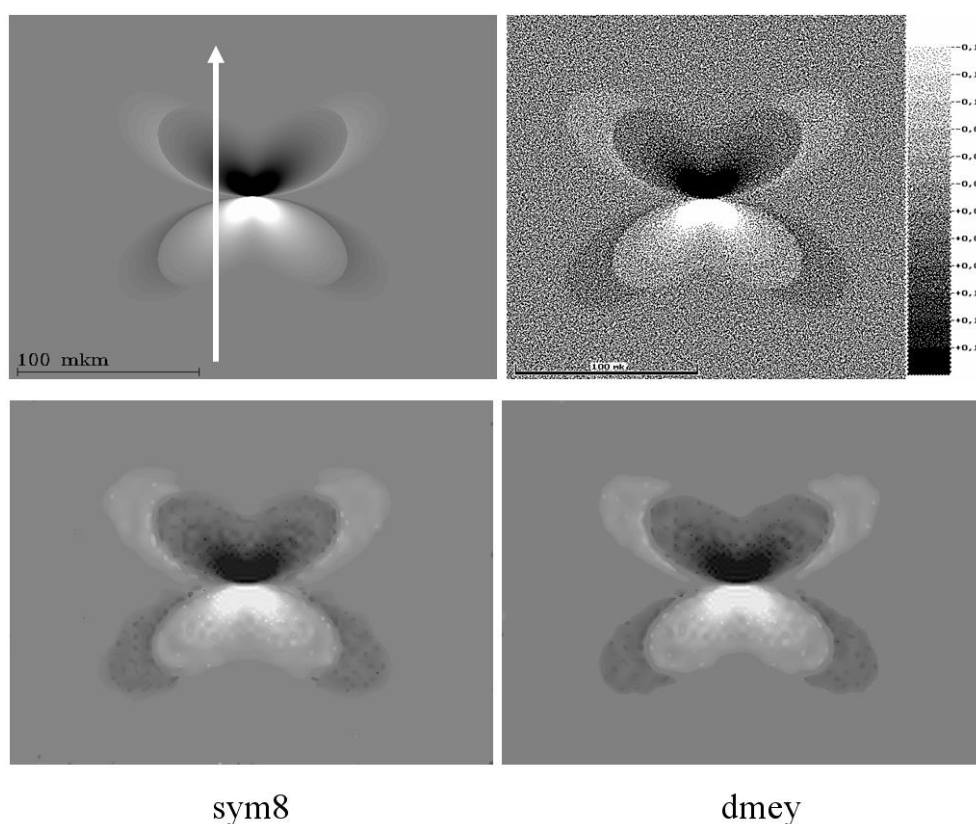


Рис.2.12. Результат вейвлет-обработки теоретического контраста краевой дислокации с моделированной зернистостью для монокристалла 6H-SiC

Из рис. 2.12–2.14 видно, что вейвлет-обработка теоретического контраста эффективно устраняет зашумляющий фактор.

Полученные после обработки изображения хорошо соответствуют их не зашумлённым аналогам, сохраняются все особенности и детали

контраста, присущие не зашумлённым теоретическим топограммам. Таким образом, вейвлет-обработка практически не привносит искажений в НЧ детали изображений и может быть использована для устранения зернистости. Такой вывод подтверждается и данными работ [40, 42, 103, 120, 168, 171, 174].

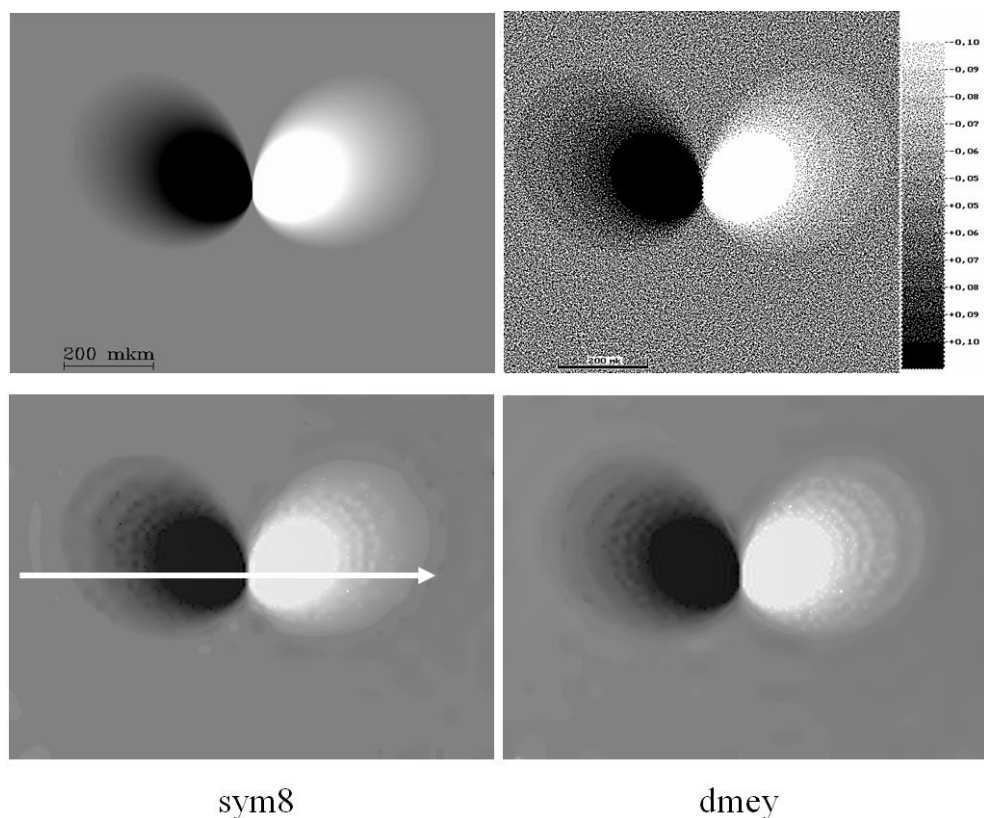


Рис.2.13. Результат вейвлет-обработки теоретического контраста винтовой дислокации с моделированной зернистостью для монокристалла 6H-SiC

Продemonстрируем предлагаемую в данном параграфе методику количественной оценки эффективности цифровой обработки на различных примерах. Начнем с теоретического контраста основных типов дефектов структуры монокристалла 6H-SiC, имеющего 64 градации серого цвета и представленного на рис. 2.12–2.14. На теоретическом контрасте смоделирована зернистость и проведена цифровая обработка вейвлетами **sym 8** и **dmey**. Такой же результат цифровой обработки получается и в случае, если

на смоделированную зернистость наложить еще и фоновую неоднородность.

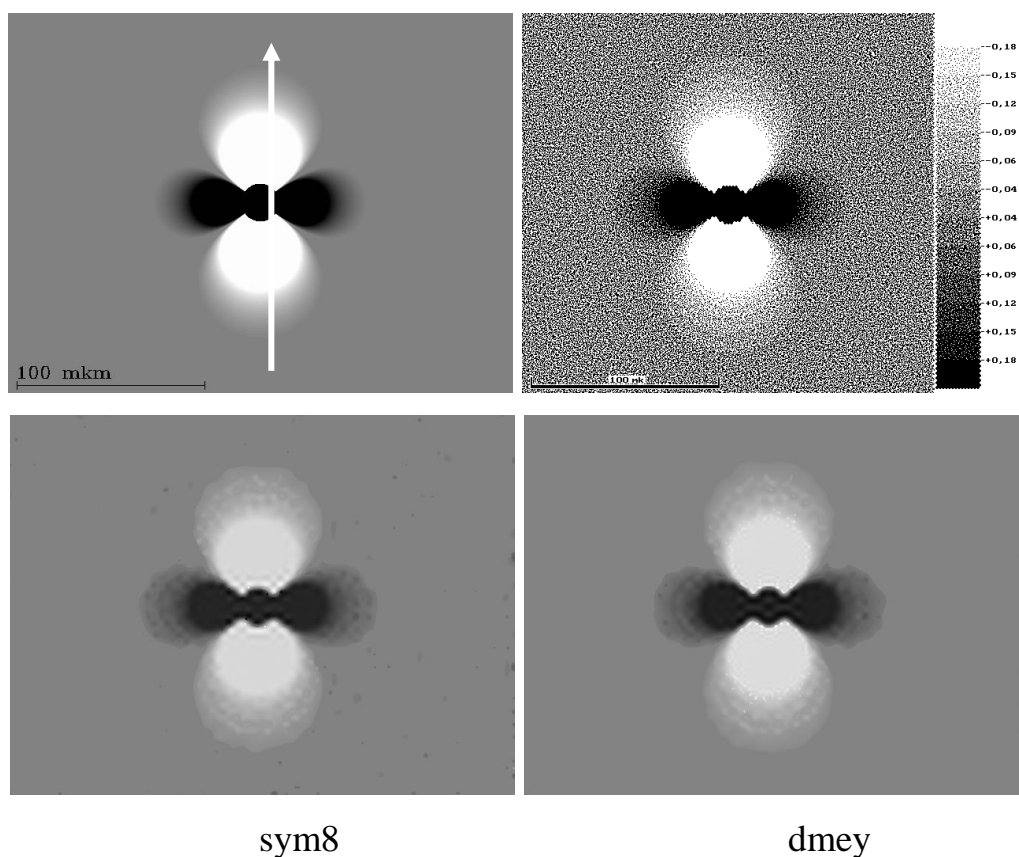


Рис. 2.14. Результат вейвлет-обработки теоретического контраста микродефекта с моделированной зернистостью для монокристалла 6H-SiC

На рис. 2.15, в качестве примера, для исходного (а, г) и обработанного вейвлетами **sym 8** (б, д) и **dmeu** (в, е) теоретического изображения винтовой дислокации приведены снятые в программе «Image-Pro Plus 6.0» профили интенсивности (ПИ), представляющие собой изменение интенсивности в направлении, указанном на рис. 2.12–2.14 стрелками, и яркостные характеристики (ЯХ), представляющие собой гистограмму анализируемого изображения.

Для ПИ по оси ординат отложена интенсивность в градациях серого цвета, изменяющаяся для 8-битных изображений в интервале 0–255, а по оси абсцисс – расстояние в пикселях. Для ЯХ по оси абсцисс отложена ин-

тенсивность (I) в градациях серого цвета (0–255), а по оси ординат – количество пикселей (N), имеющих определенную интенсивность.

Сравнив для исходного и обработанного теоретического контраста ПИ, получаем, что в случае обработки вейвлетом **dmey** наблюдается несколько большая флуктуация интенсивности, чем для вейвлета **sym 8**. Но это различие не столь значительно, чтобы уверенно говорить о преимуществе того или иного вейвлет-базиса.

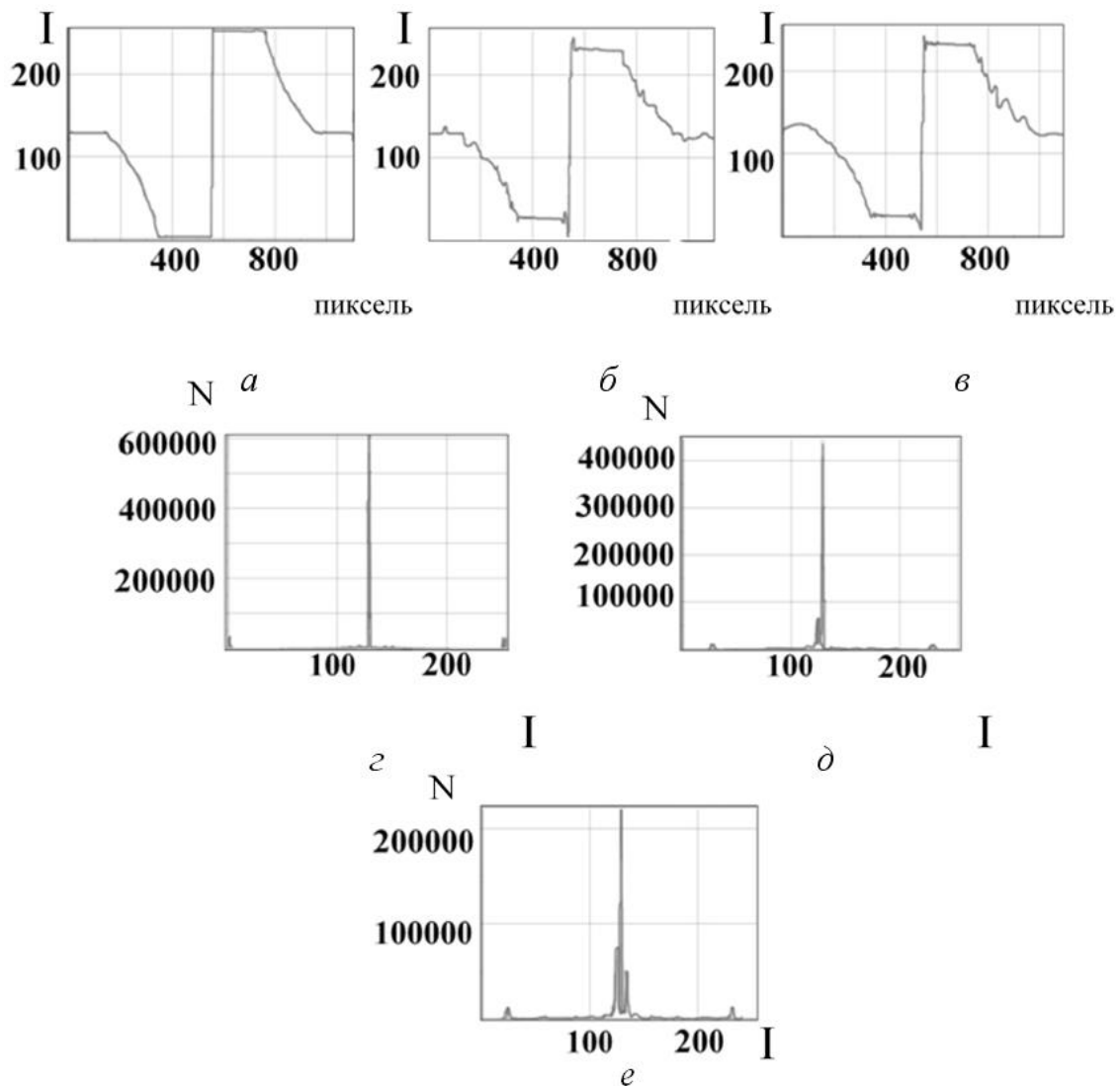


Рис. 2.15. Профили интенсивности (а, б, в) и яркостные характеристики (г, д, е) исходного (а, г) и подвергнутого цифровой обработке вейвлетами **sym 8** (б, д) и **dmey** (в, е) зашумленного теоретического изображения винтовой дислокации

Если сравнивать максимумы ЯХ исходного теоретического контраста и обработанных различными вейвлетами, то имеем: для исходного – 600000, для **sym 8** – 450000 и **dmey** – 200000. Так как значение максимума ЯХ для вейвлета **sym 8** ближе к исходному, он и является наиболее оптимальным. Таким образом, количественным критерием эффективности цифровой обработки можно использовать ЯХ. Чем ближе обработанное вейвлетами «зашумленное» изображение к исходному теоретическому, тем выше качество цифровой обработки.

Построим разностный контраст между обработанными и исходным изображениями (рис. 2.16).

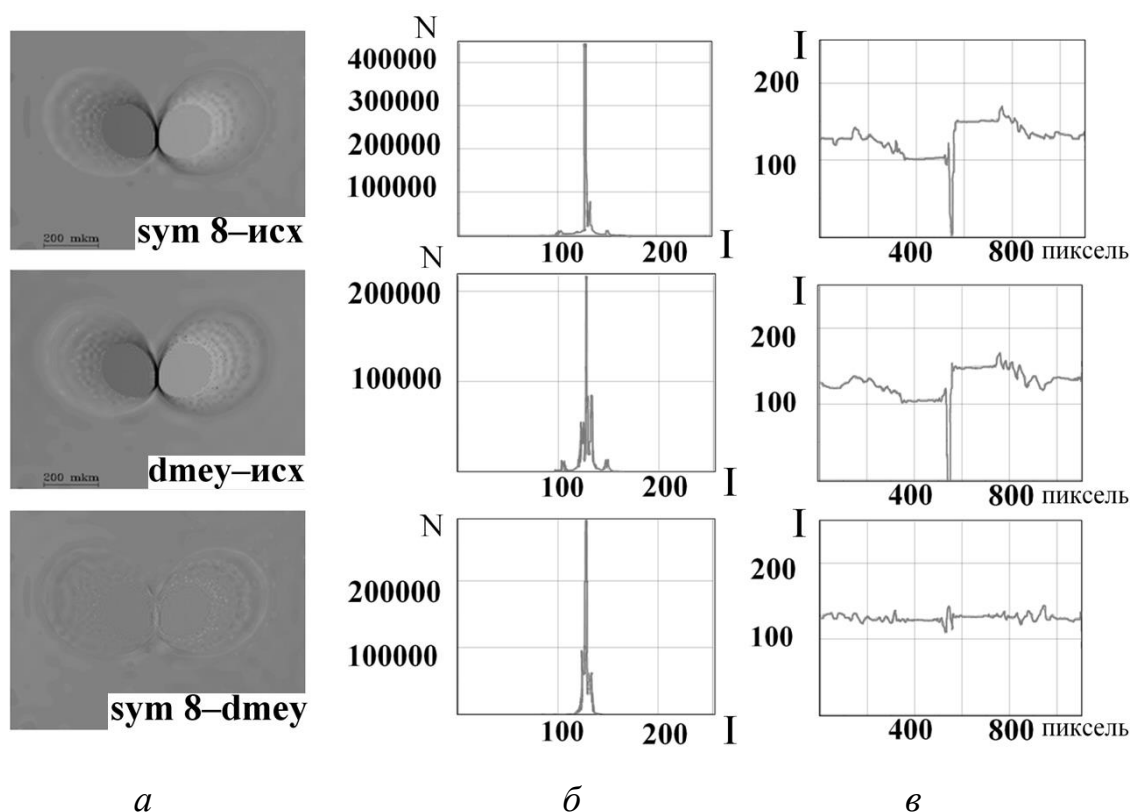


Рис. 2.16. Разностный контраст между двумя изображениями «sym 8-исходное», «dmey-исходное» и «sym 8-dmey» (a), ЯХ (б) и ПИ (в)

Если после цифровой обработки «зашумленный» контраст идеально соответствует теоретическому, то разностный контраст (РК) является нулевым разностным контрастом и представляет собой однородный по всей площади изображения фон. Анализируя РК для «sym 8-исходное»,

«**dmey–исходное**» и «**sym 8–dmey**» видим, что они не являются нулевыми. Визуальное сравнение РК и построенных ПИ «**sym 8–исходное**» и ПИ «**dmey–исходное**» не позволяет отдать предпочтение какому-либо вейвлет-базису (рис. 2.16,а,в). Для ЯХ наоборот, наблюдается резкое различие: для «**sym 8–исходное**» – 400000 и «**dmey–исходное**» – 200000. Разностный контраст для «**sym 8–dmey**», несмотря на визуальную схожесть, не является нулевым. Следовательно, результат цифровой обработки различными вейвлет-базисами различен. При таком представлении анализируемого контраста наиболее оптимальным является вейвлет **sym 8**.

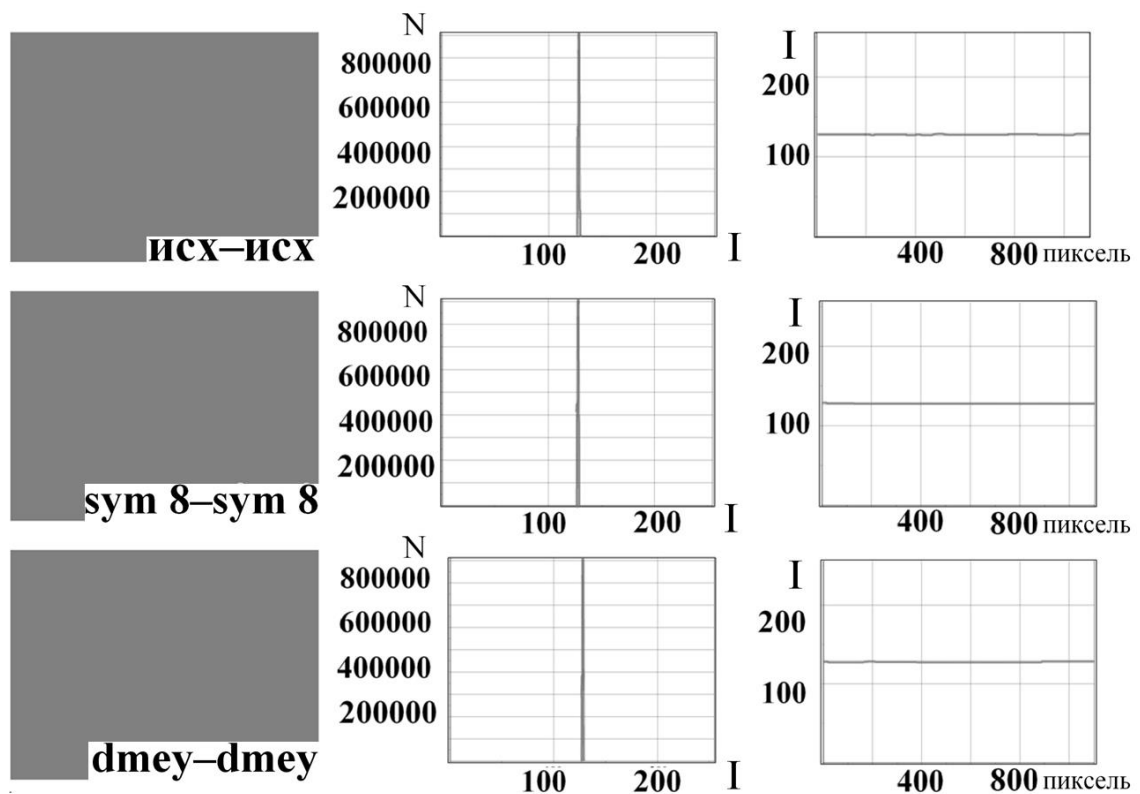


Рис. 2.17. Нулевой разностный контраст между двумя изображениями «исходное–исходное», «**sym 8–sym 8**» и «**dmey–dmey**» (а), ЯХ (б) и ПИ (в)

Построим нулевые разностные контрасты для исходного и обработанных изображений: «исходное–исходное», «**sym 8–sym 8**» и «**dmey–dmey**» (рис. 2.17). Они представляет собой изображения с однородным по

всей площади фоном. ПИ имеют вид прямых линий, параллельных оси абсцисс. Максимум ЯХ для всех случаев имеет одинаковое значение – 900000. Таким образом, чем ближе значение максимума ЯХ разностного контраста к максимуму ЯХ нулевого РК, тем выше эффективность и качество цифровой обработки данным вейвлет-базисом. В нашем случае это значение выше для вейвлета **sym 8**, следовательно, он и является наиболее оптимальным.

Аналогичный результат получается и при использовании в качестве тестового объекта теоретических контрастов краевой дислокации и микродефекта.

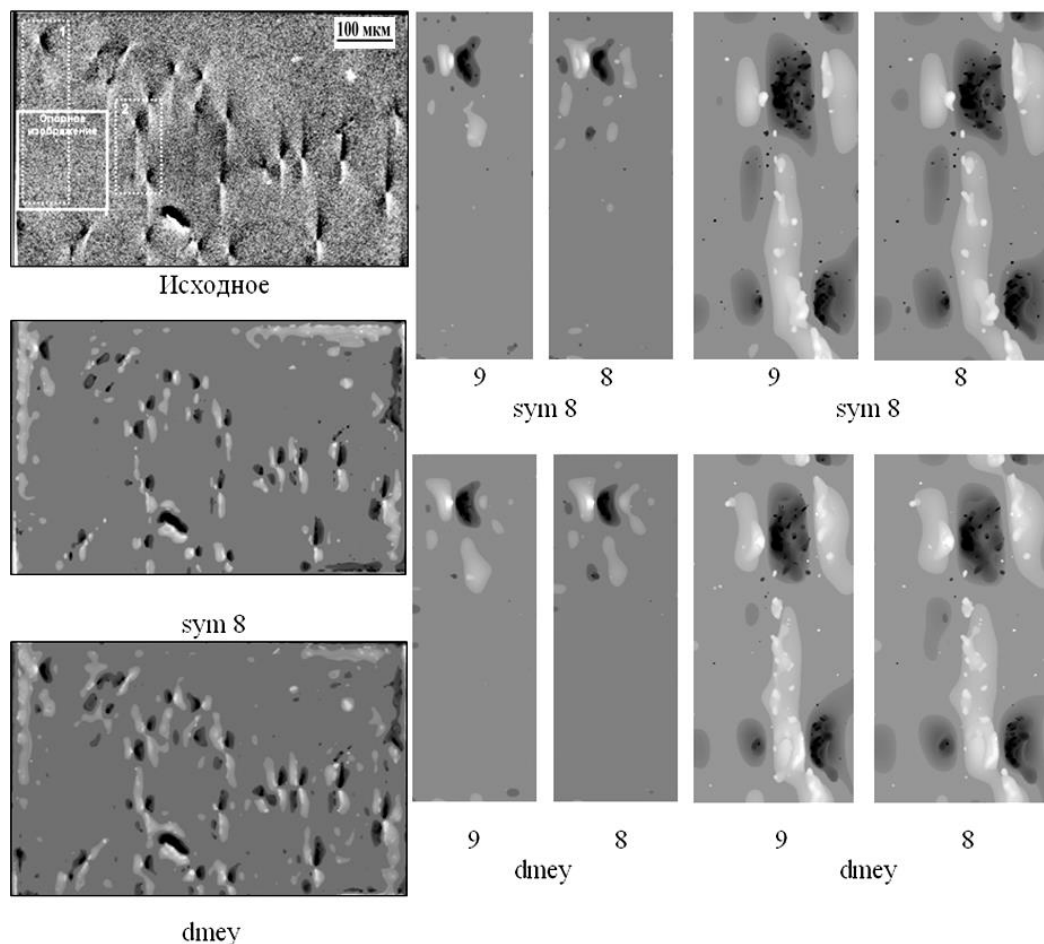


Рис. 2.18. Фрагмент топограммы монокристалла 6H-SiC, содержащий скопление краевых дислокаций, и результат цифровой обработки различными вейвлет-базисами (sym 8 и dmeu) фрагмента (слева) и областей 1 и 2, выделенных на исходном изображении, для 8 и 9 уровней декомпозиции (справа)

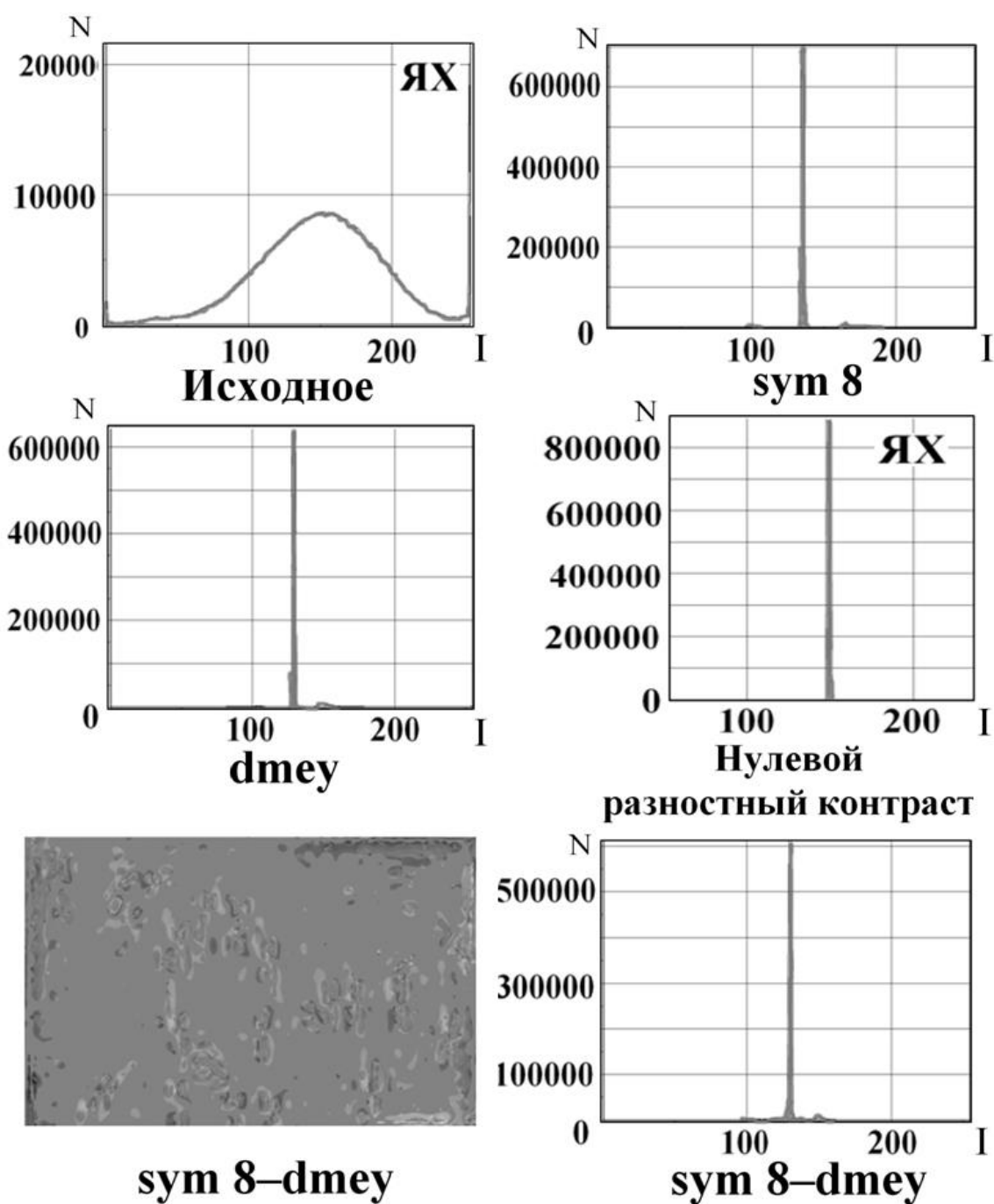


Рис. 2.19. Пример количественной оценки эффективности цифровой обработки экспериментального топографического контраста монокристалла 6H-SiC, содержащего скопление краевых дислокаций, различными вейвлет-базисами

Проверим результат, полученный на тестовом объекте, на экспериментальном изображении: фрагменте топограммы монокристалла 6H-SiC,

содержащем скопление краевых дислокаций (рис. 2.18). Результат цифровой обработки по методике, описанной выше, представлен на рис. 2.19.

Для экспериментального контраста получается аналогичный результат. Максимум ЯХ в случае обработки топограммы вейвлетом **sym 8** находится выше, чем для вейвлет-базиса **dmey**: примерно 700000 и 640000. Разностный контраст «**sym 8–dmey**» так же не является нулевым. Следовательно, и для экспериментального контраста мы получили результат, аналогичный тестовым изображениям, т.е. теоретическому контрасту.

Данная методика была успешно апробирована на поляризационно-оптических изображениях дефектов структуры различных монокристаллических материалах, имеющих сильную фоновую неоднородность и подвергнутых, для её устранения цифровой обработке вейвлетами, а также для сравнения эффективности цифровых методов, изображений, представленных в 8-, 16- и 32-битном формате и т.д.

2.6. Количественная оценка эффективности различных методов цифровой обработки

Представляет интерес сравнение между собой результатов цифровой обработки по устранению фоновой неоднородности поляризационно-оптического контраста монокристалла 6H-SiC, полученные двумя методами, имеющими некоторые общие подходы обработки [40, 42, 103, 120, 167–172].

Первый метод. Основан на выделении при дискретном вейвлет-анализе фоновой неоднородности и её вычитании из исходного контраста (метод рассмотрен в первой главе) и включает четыре этапа (рис.2.20):

1 этап – обнуление детализирующих коэффициентов и выделение после обработки только фоновой неоднородности (рис. 2.20,б);

2 этап – построение РК между исходным контрастом и полученным на первом этапе (рис. 2.20,в);

3 этап – гаусс-размытие РК, подбираемое экспериментально (рис.

2.20,з);

4 этап – строится результирующий РК между размытым на 3 этапе и РК, полученным на 2 этапе (рис. 2.20,б). Для лучшего визуального восприятия полученного контраста и лучшей его детализации проводится коррекция динамического диапазона (рис. 2.20,д). Изображение, полученное по первому методу, имеет высокое качество с хорошей проработкой основных деталей контраста и подавленным явлением элайзинга.

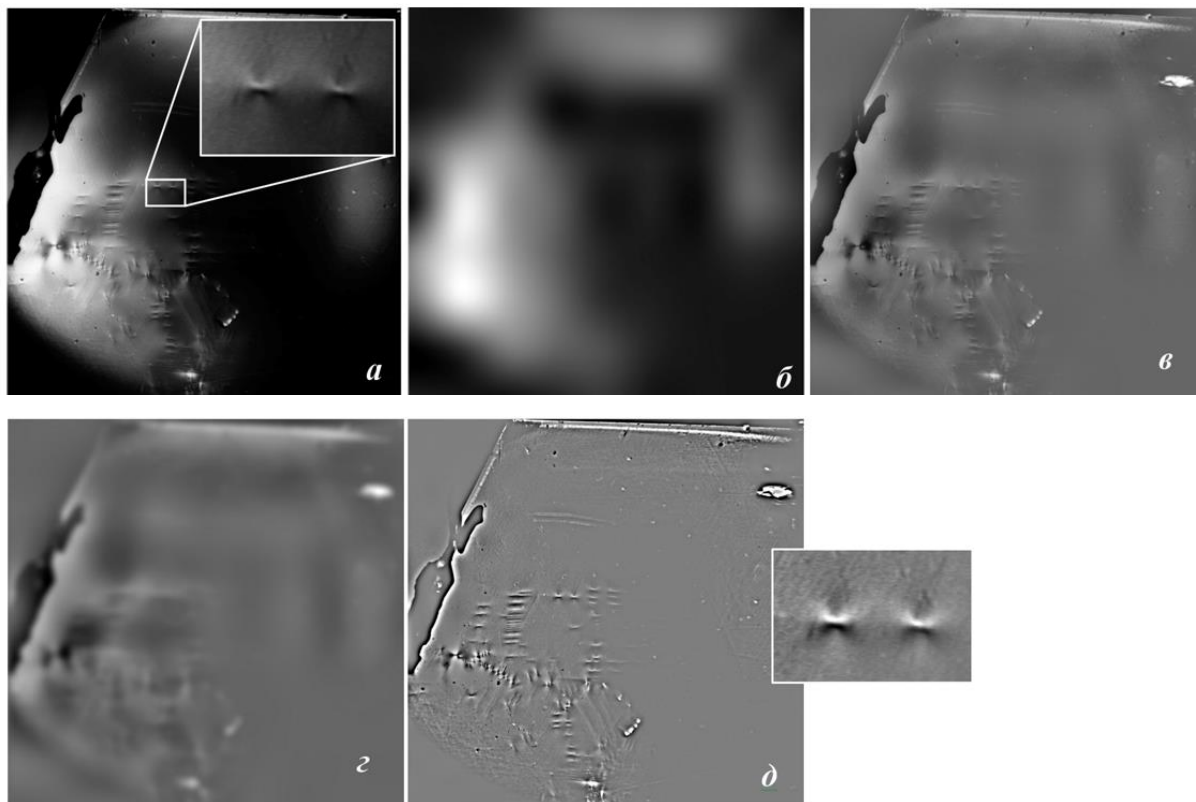


Рис. 2.20. Последовательность устранения фоновой неоднородности поляризационно-оптического контраста монокристалла 6H-SiC: а – исходный; б–д – последовательно 1–4 этапы цифровой обработки для 7 уровня декомпозиции

Второй метод. Также рассмотрен в первой главе и включает в себя следующие этапы:

1 этап – гаусс-размытие исходного изображения (подбирается экспериментально). На изображении, как и в первом методе, теряются все мелкие детали контраста, относящиеся к дефектам структуры (рис. 2.21,б);

2 этап – построение РК между размытым и исходным изображениями (рис. 2.21,б);

3 этап – коррекция динамического диапазона (рис. 2.21,г).

Контраст после вейвлет-обработки (первый метод), содержащий только фоновую неоднородность (рис. 2.20,б), и контраст, полученный после гаусс-размытия во втором методе (рис. 2.21,б), визуально очень похожи, но, сравнивая визуально эти контрасты между собой после коррекции динамического диапазона видим, что они существенно отличаются друг от друга (рис. 2.20,д и рис. 2.21,г).

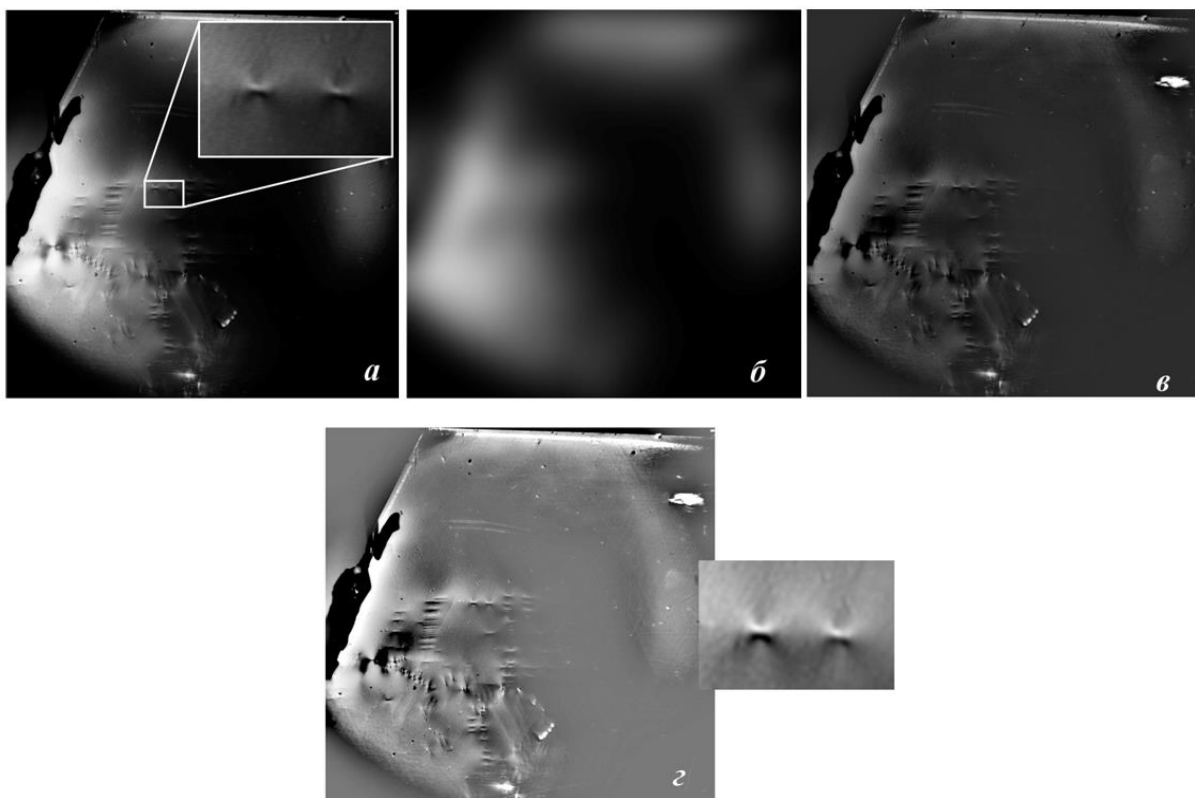


Рис. 2.21. Последовательность устранения фоновой неоднородности поляризационно-оптического контраста монокристалла 6H-SiC по второму методу: а – исходный; б – гаусс-размытие; в – построение разностного контраста; г – коррекция динамического диапазона

Объективной количественной оценкой их различия может служить то, что РК, представленные на рис. 2.20,б и рис. 2.21,б, не являются нуле-

выми, о чем свидетельствуют максимальные значения яркостных характеристик (ЯХ), рис. 2.22.

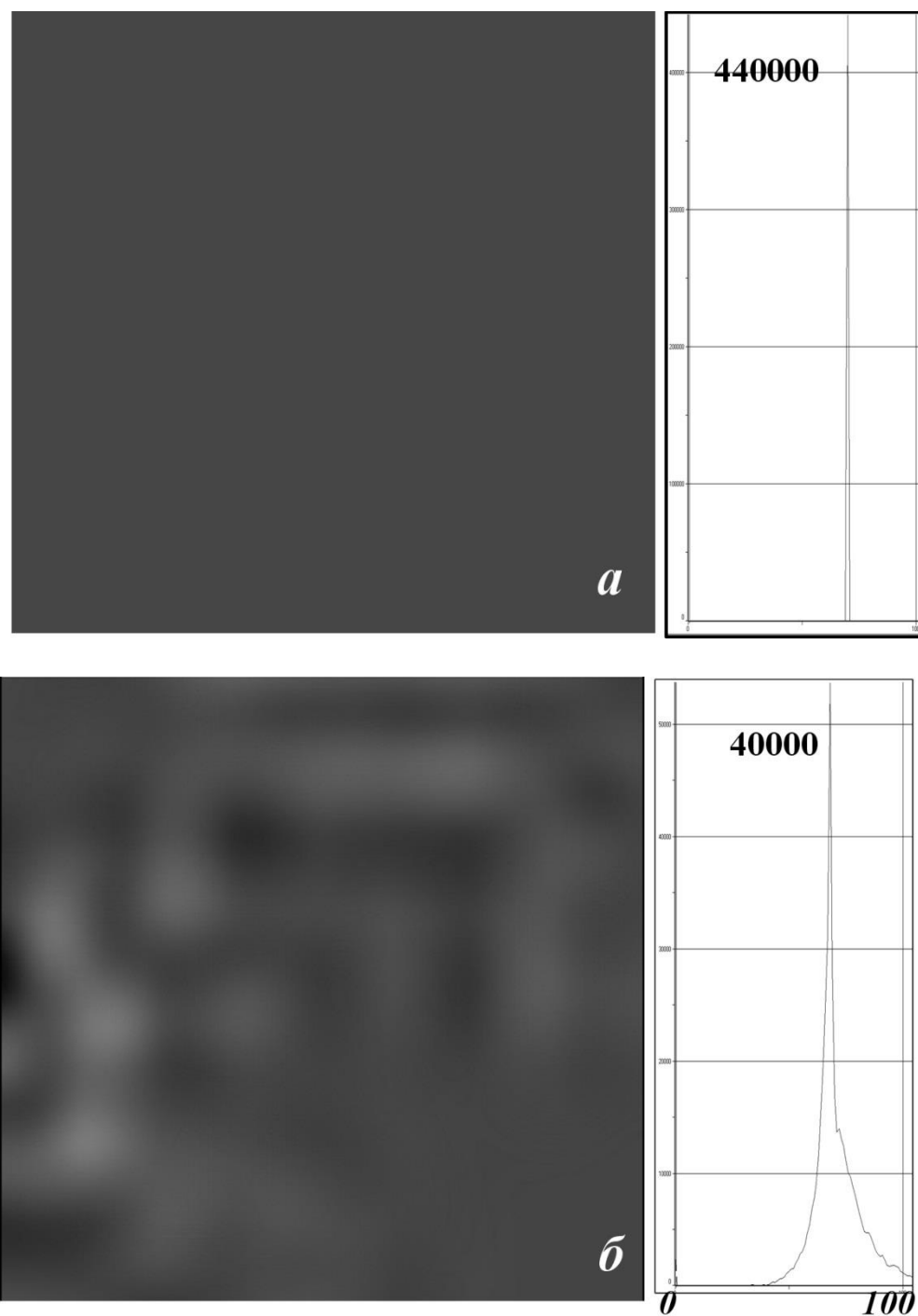


Рис. 2.22. Разностный контраст и яркостные характеристики поляризационно-оптического контраста монокристалла 6H-SiC: а – нулевой РК и его ЯХ; б – РК и ЯХ между контрастами на рис. 2.20,б и рис. 2.21,б

Для нулевого РК максимум ЯХ имеет значение 440000, а для полу-

ченного – 40000. Чем больше разница в значениях РК, тем больше отличаются контрасты друг от друга.

2.7. Количественная оценка эффективности цифровой обработки HDR-изображений

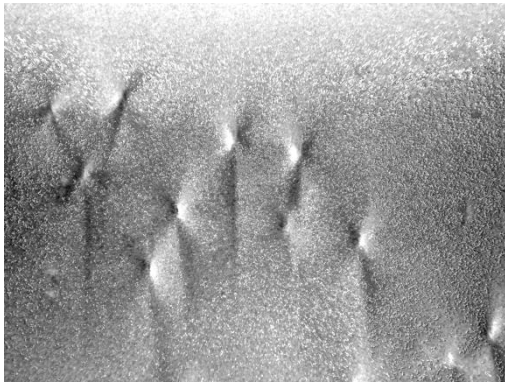
HDR-изображения – изображения с расширенным динамическим диапазоном (изображения 32-битного формата), содержащие, как это было показано ранее в работах [40, 42, 103, 120, 175], больше полезной информации о структурном совершенстве исследуемых материалов и «тонких» особенностях экспериментального контраста. На примере фрагмента топограммы монокристалла 6H-SiC (рис. 2.23) сравним между собой два HDR-изображения, переведенных для последующей вейвлет-обработки в 8-битный и 16-битный форматы.

Цифровая обработка проводилась с использованием вейвлета Мейера (dmey). Визуальное сравнение исходных изображений исследуемого монокристалла, представленных в разных форматах, не выявляет их различия.

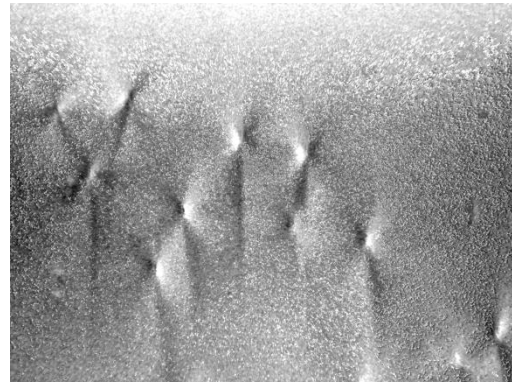
Разностные контрасты между самими изображениями (8-8 бит и 16-16 бит) являются нулевыми, их профили интенсивности и яркостные характеристики идентичны по форме и по цифровым значениям.

Построив разностный контраст между исходными изображениями (8-16 бит), получаем не нулевой разностный контраст. Профиль интенсивности уже не представляет прямую линию, параллельную горизонтальной оси, а имеет сильную флуктуацию интенсивности. Максимумы яркостных характеристик нулевого и не нулевого разностных контрастов имеют различные значения, а сами характеристики отличаются по форме. Таким образом, и в этом случае удастся просто и надежно выделить различия сравниваемых изображений, визуально не определяемые.

Аналогично можно выделить отличия между HDR-изображениями, сохраненными в разных форматах, после их вейвлет-обработки.



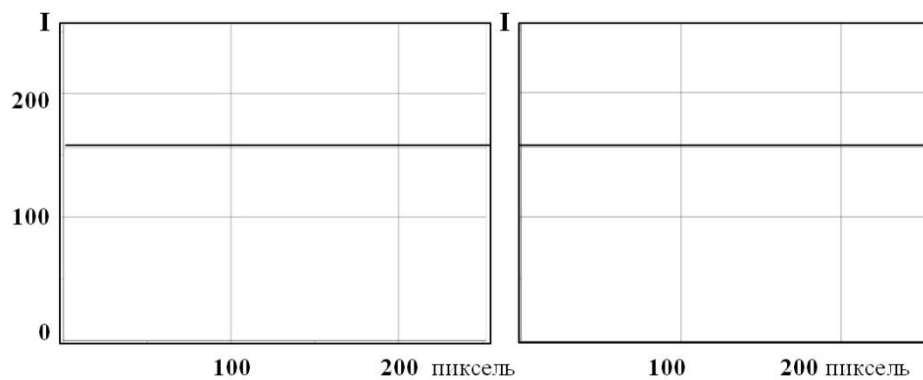
HDR-изображение в формате 8-бит



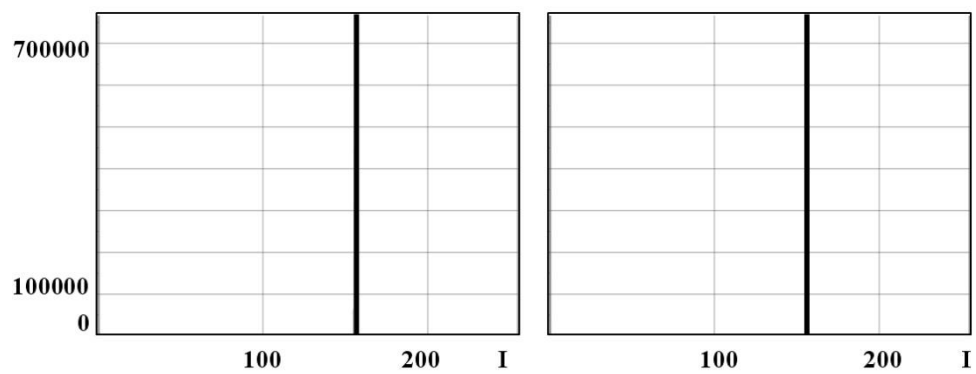
HDR-изображение в формате 16-бит



Нулевой РК (исходное–исходное)

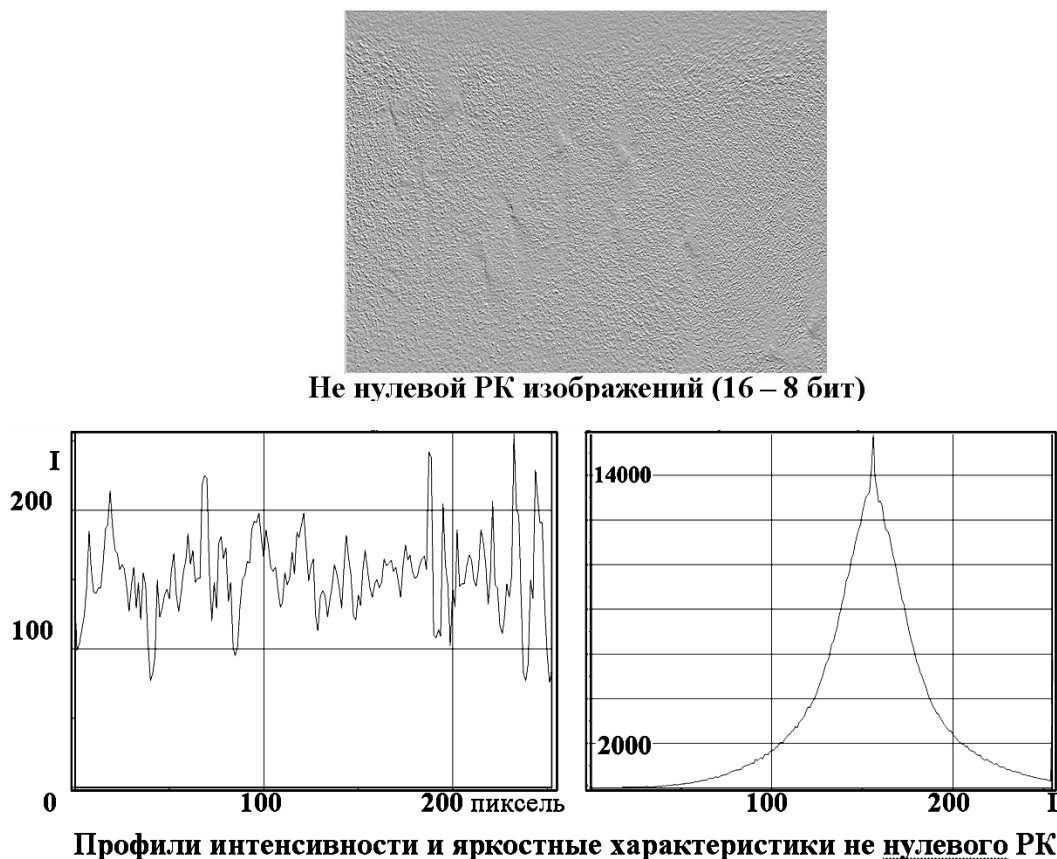


Профили интенсивности нулевого РК



Яркостные характеристики нулевого РК

*a**б*



в

Рис. 2.23. Количественный анализ HDR-изображений монокристалла 6H-SiC: а – 8-битный формат; б 16-битный формат; в – не нулевой РК, его ПИ и ЯХ

2.8. Выводы

В ходе проведенных исследований установлено, что применение на практике методик количественной оценки качества экспериментальных топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов позволяет существенно снизить субъективный фактор, основанный на визуальном восприятии анализируемого контраста, и в большей степени избежать ошибок при идентификации дефектов и их локализации в объеме монокристалла.

Методика оценки качества SSIM (по структурной схожести изображений) является более перспективной по сравнению с метриками MSE и PSNR (соответственно, вычисление среднеквадратичного отклонения и

пикового отношение сигнала к шуму). Причиной тому служит особенность самой метрики SSIM, при расчете которой учитываются яркостные, контрастные и структурные особенности сравниваемых изображений.

Наиболее простой, эффективной и экспрессной является методика количественной оценки качества изображений, основанная на построение разностного контраста, яркостных характеристик и профилей интенсивности. Вся необходимая информация об анализируемых изображениях в течение 20–30 секунд получается в специализированной для обработки сложных сигналов программе «Image-Pro Plus 6.0»: построение разностного контраста, яркостных характеристик и профилей интенсивности по любому выбранному направлению. Методика апробирована при сравнении большого количества разнообразных изображений и показала высокую эффективность, чувствительность и экспрессность.

Анализ полученных при вейвлет-обработке результатов с применением количественных критериев оценки свидетельствует о том, что:

- вейвлет-обработка экспериментального контраста не вносит визуально видимых его искажений;
- при цифровой обработке топографических и поляризационно-оптических изображений наилучший результат по сравнению с другими, входящими в математический программный пакет «Matlab», получается при использовании вейвлет-базиса Симлета (**sym 8**).

ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ВЕЩЕСТВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Глобальная компьютеризация, выпуск большого количества разнообразной и высококачественной оргтехники (персональных компьютеров, сканеров, цифровых фотоаппаратов и камер, принтеров и ксероксов) делают доступным разработку и внедрение в научно-исследовательский процесс и в производство новых методик контроля качества различных объектов и процессов, основанных на цифровой обработке сигналов и изображений.

Рассмотренные в предыдущих главах методики цифровой обработки показали свою эффективность при исследовании структурного совершенства монокристаллических материалов. Представляет интерес применить цифровые методики для экспресс диагностики качества веществ и материалов имеющих другую физико-химическую природу, например, для исследования биологических объектов, разнообразных продуктов питания, жидких сред и оценить влияние на их качество различных технологических и внешних факторов. Одним из параметров, объективно характеризующим качество вещества, является его цвет.

В основе всех цифровых методик, рассматриваемых ниже в данной работе, лежит регистрация цвета исследуемого объекта и его изменение при различных воздействиях.

3.1. Основные диагностические методы

Экспресс-методики контроля качества мясного сырья, продуктов питания и других объектов основаны на цифровой обработке изображений, полученных путём их оцифровывания на планшетном сканере или цифровым фотоаппаратом с последующей цифровой обработкой в специализированных программах.

Для всех образцов исследуемого объекта устанавливали одинаковые

режимы сканирования, которые выбирались таким образом, чтобы с помощью программного обеспечения сканера добиться наибольшей детализации изображений. Далее для оцифрованных изображений в одной из программ «Mathcad», «Matlab» или «Image-Pro Plus» строили области равного контраста (ОРК), разностный контраст (РК), яркостные характеристики (ЯХ) и по заданным направлениям профили интенсивности (ПИ). По изменениям этих характеристик можно объективно судить о действии на исследуемый объект интересующего нас фактора, который приводил к изменению цветовых характеристик объекта и влиял на его качество.

Последовательность эксперимента и регистрируемые характеристики исследуемых объектов представлены на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Последовательность цифровой обработки исследуемых объектов

Разностный контраст получается путём вычитания одного изображения из другого, например, изображений исследуемого образца продукта до и после какого-либо воздействия на него или изображений различных сравниваемых объектов (продукции разных производителей). Для устранения влияния материала кюветы и получения контраста, формируемого

только исследуемым объектом, из просканированного изображения вычиталось предварительно просканированное изображение пустой кюветы. Анализируемые изображения должны иметь одинаковые размеры. Как будет показано ниже, если исследуемое изображение имеет даже незначительные цветовые отличия, то построенные РК, ЯХ, ПИ и ОРК надежно отражают этот факт. Если изменений нет, имеем нулевой РК, представляющий собой однородный фон, а при наличии изменений – не нулевой РК с соответствующей фоновой неоднородностью. Профили интенсивности, построенные для нулевого РК, имеют вид прямых линий, а ЯХ представляют собой узкие вертикальные полосы.

Яркостные характеристики показывают зависимость числа точек N , имеющих определённое значение интенсивности I в градациях серого цвета: для 8-битного изображения 255 градаций, для 16-битного изображения 65535 градаций. Для ЯХ по оси абсцисс откладывается интенсивность в градациях серого цвета, по оси ординат – количество точек, имеющих данную интенсивность.

Для ряда методик ПИ являются менее информативными по сравнению с РК и ЯХ, но, все-таки, могут содержать полезную информацию об исследуемом объекте. При исследовании посола мяса именно ПИ позволяли рассчитать важнейшие характеристики процесса: скорость процесса и глубину проникновения в мясо как посолочной смеси так и её компонентов. Для ПИ по оси ординат откладывается интенсивность I в градациях серого цвета, а по оси абсцисс – размер изображения в пикселях.

При анализе изменений цветовых характеристик удобно воспользоваться построением областей (линий) равного контраста (ОРК), количество которых можно легко менять в зависимости от требуемой точности регистрации изменений цвета. Построение ОРК и ПИ успешно применялось при исследовании различных способов посола мяса, для регистрации и определения глубины проникновения в мясо посолочной смеси и ее компонент.

Для устранения влияния на РК, ЯХ, ПИ и ОРК границ волокон мышечной и соединительной тканей, изображения можно подвергнуть в одной из программ – «Matlab», «Adobe Photoshop», «Image-Pro Plus» и других обработке линейным фильтром, например, гаусс-размытию. В зависимости от решаемых задач оптимальный радиус гаусс-размытия подбирается экспериментально. С увеличением радиуса размытия существенно уменьшается флуктуация интенсивности, возрастает максимальное значение ЯХ, а ПИ становятся плавными и более удобными для анализа и сравнения. Если исследуемые объекты имеют цветовые отличия, пусть даже визуально не выявляемые, то в РК, ЯХ и ПИ, построенные как для исходных, так и для размытых изображений, будут это надежно отражать.

При диагностике любого вещества цифровой обработке лучше подвергать цветные изображения (формат RGB). При этом для исследуемых объектов удастся получить наиболее полную информацию: ЯХ и ПИ строятся для трёх цветовых каналов – красного, зелёного и синего; возможно разложение изображения по цветовым каналам. Для анализа берётся тот цветовой канал, который зарегистрировал наибольшие изменения в изображениях исследуемого объекта.

Изображения, представленные в чёрно-белом формате, также могут быть использованы для качественной и количественной оценки: построенные ОРК, РК, ЯХ и ПИ содержат достаточную информацию для объективной оценки и принятия правильного решения [191–194].

Для устранения влияния на результат цифровой обработки особенностей экспериментального контраста (структуры мясной ткани или колбасы), необходимо строить нулевые РК для сравниваемых изображений, далее строить РК, ЯХ и ПИ для нулевых разностных контрастов. При таком алгоритме цифровой обработки удастся надежно зафиксировать отличие цветовых характеристик мяса различных частей туши, разных производителей и действие внешних факторов.

Таким образом, используя рассмотренные выше приемы цифровой

обработки, можно надёжно и быстро зарегистрировать различия цветовых характеристик объектов различной физико-химической природы, и действие на них различных факторов.

3.2. Компьютерная диагностика качества мясного сырья

Мясное сырьё разных поставщиков может существенно отличаться по цвету и, соответственно, по своему качеству. Качество сырья в сильной степени зависит от большого количества факторов: породы скота, кормовой базы, заболеваний, условий транспортировки, хранения, забоя и многих других. В связи с этим представляет интерес сравнить образцы мяса разных производителей и полученных из различных регионов, например, говядины, и практически оценить возможность регистрации их качества по отличию цветовых характеристик.

Исследованию было подвергнуто мясо говядины разных морфологических частей туши: шейный, грудо-рёберный и тазобедренный отрубы; разных производителей – отечественное (мясо производителей Новгородской, Псковской, Ленинградской областей) и импортное, закупленное в Канаде и Бразилии.

Кусочки мяса размером, примерно, 6×6 см и толщиной до 1 см помещали в контейнеры, изготовленные из высококачественного стекла толщиной 1 мм, используемого для производства ядерных фотопластинок. Исследуемый образец занимал практически весь объём контейнера, который сверху герметично закрывался стеклянной пластинкой. Время, прошедшее с момента отбора образцов до оцифровки, не превышало пяти минут. После первичной оцифровки образцов контейнеры хранились в холодильнике при температуре 4–6 °С. В некоторых экспериментах образцы хранились в естественных условиях при комнатной температуре. В этом случае контейнеры не снимались со сканера, и сканирование кюветы с исследуемым образцом проводилось через установленные в эксперименте интервалы времени [195–200].

На рис. 3.2 и 3.3 представлены просканированные образцы мяса говядины трёх разных производителей – условно **А**, **В** и **С**, взятые из наружной части тазобедренного отруба и шейного отруба туши. Температура исследуемых образцов составляла $4\div 6\text{ }^{\circ}\text{C}$. При визуальном осмотре исследуемые образцы казались практически одинаковыми по цвету. Оцифровка изображений мяса в ручном режиме и последующая цифровая обработка позволяют надёжно зафиксировать отличие цветовых характеристик исследуемых образцов, как для разных производителей, так и для различных частей туши.

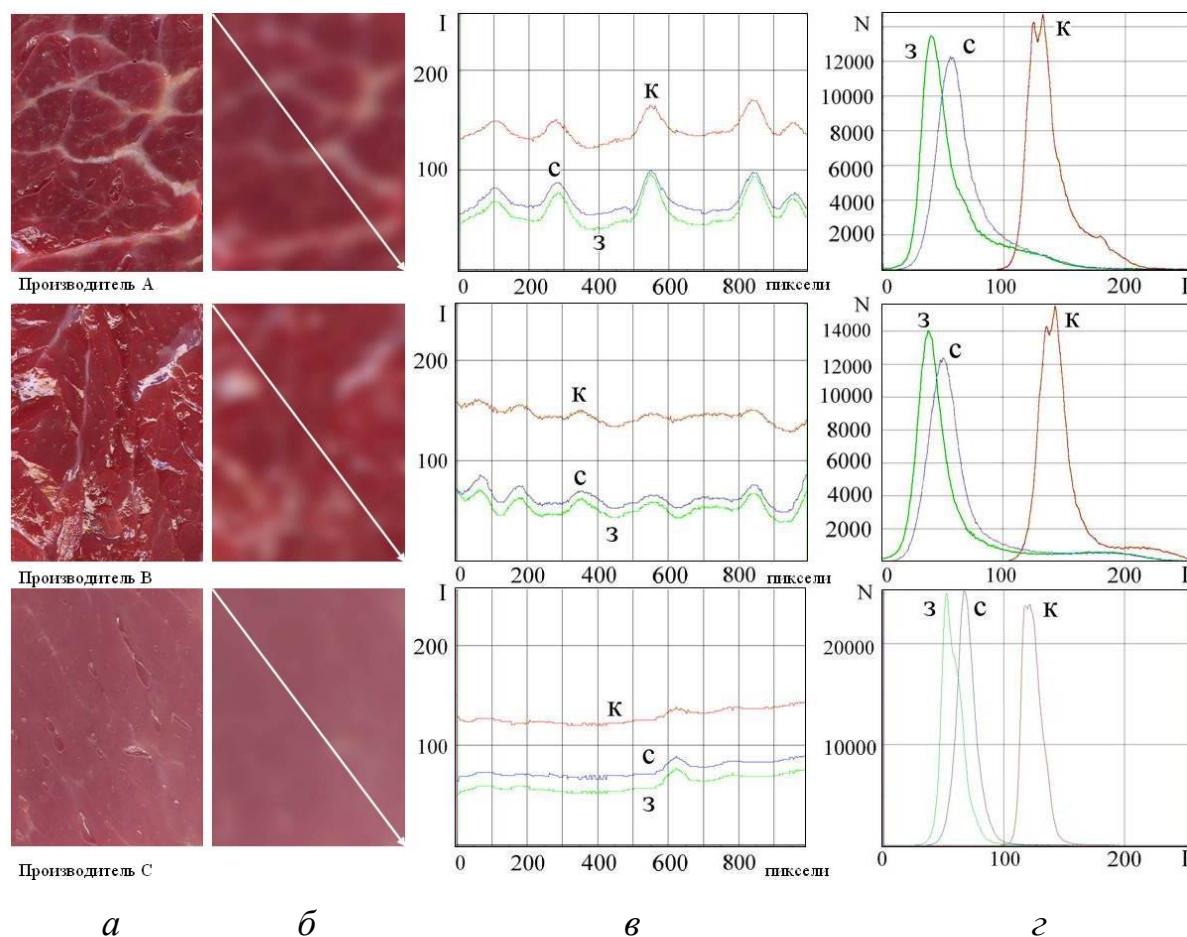


Рис. 3.2. Цифровая обработка изображений образцов говядины производителей **А**, **В** и **С**, взятых из наружной части тазобедренного отруба туши: **а** – исходное; **б** – после гаусс-размытия (радиус размытия 20 пикселей); **в** – ПИ и **г** – ЯХ, снятые для красной (К), синей (С) и зеленой (З) компонент

Качественные и количественные отличия между образцами хорошо отображают РК, ПИ и ЯХ. Наиболее удобными для количественного анализа являются РК и ЯХ. Для уменьшения флуктуаций интенсивности, обусловленных влиянием границ между волокнами мышечной ткани, исходные изображения подвергались гаусс-размытию, радиус гаусс-размытия составлял 20 пикселей (рис. 3.2, б и рис.3.3, б).

Максимальные значения ЯХ цветного изображения для образцов говядины, взятых из наружной части тазобедренного отруба туши, являются практически одинаковыми у производителей **А** и **В**, а у производителя **С** максимальные значения ЯХ значительно отличаются. Визуально определить различие цвета мяса было практически невозможно.

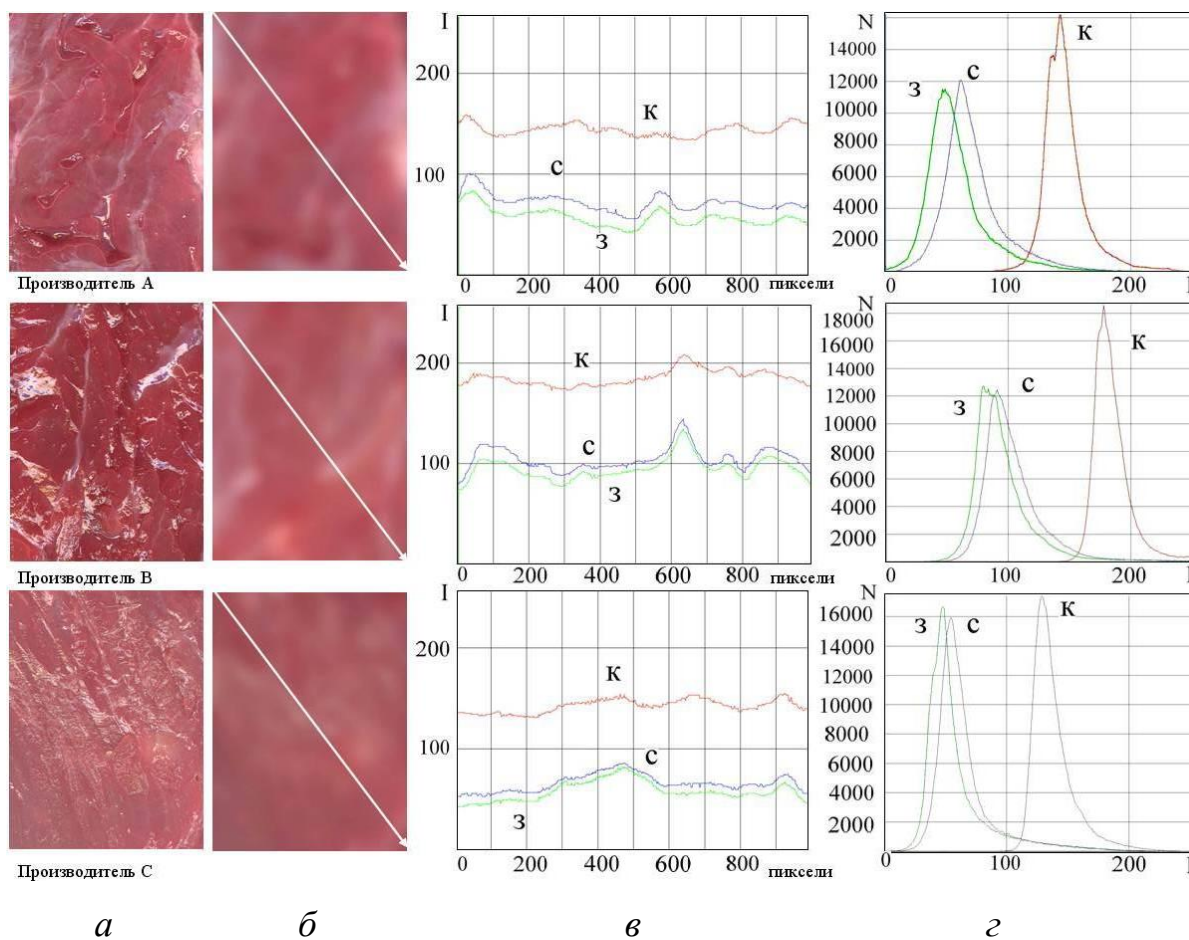


Рис. 3.3. Цифровая обработка изображений образцов говядины производителей **А**, **В** и **С**, взятых из шейного отруба туши: *а* – исходное; *б* – после гаусс-размытия (радиус размытия 20 пикселей); *в* – ПИ и *г* – ЯХ, снятые для красной (К), синей (С) и зеленой (З) компонент

Для образцов говядины, взятых из шейного отруба туши, наиболее близкими являются значения максимумов ЯХ у производителей **А** и **В** для зелёного и синего цветовых каналов, а у производителей **В** и **С** для красного канала.

Нарушение условий хранения и транспортировки, неоднократная заморозка мясного сырья приводит к существенному снижению его качества, и, как следствие, к снижению качества изготовленных из него мясных продуктов [198–201]. На рис. 3.4 представлены изображения говядины, взятой из наружной части тазобедренного отруба туши, которая была подвергнута заморозке при температуре минус 18 °С и последующей разморозке при $t=14\div16$ °С.

Анализ изображений показал, что невидимые изначально человеческим глазом изменения цвета, происшедшие в мясе, надёжно зафиксированы при цифровой обработке изображения. Заморозка и последующая разморозка мясного сырья приводят к изменениям его яркостных характеристик, т.е. цвета. Интенсивность в градациях серого цвета, соответствующая максимуму ЯХ, при этом изменяется незначительно, а количество точек, имеющих данную интенсивность для красного, зелёного и синего каналов изображения, заметно снижается. Изменение ЯХ можно проследить при обработке РК (рис. 3.4, *г*), полученного вычитанием изображения мяса после разморозки и охлаждённого. ПИ построенные для такого РК являются менее удобными для анализа, чем ЯХ. При вычитании одного и того же изображения мяса (охлаждённого из охлаждённого) получаем нулевой РК, представляющий собой однородный фон. ПИ и ЯХ для такого контраста имеют вид, представленный на рис. 3.4, *в*. Такой вид РК, ПИ и ЯХ будет соответствовать отсутствию каких-либо изменений при сравнении изображений различных образцов или отсутствию влияния на образец исследуемого фактора.

На рис. 3.5 представлены результаты регистрации изменений цветовых характеристик говядины парной ($t = 36$ °С) до и после хранения в те-

чение 24 часов в холодильнике при температуре 4–6 °С и относительной влажности воздуха 75 % ($t = 4$ °С).

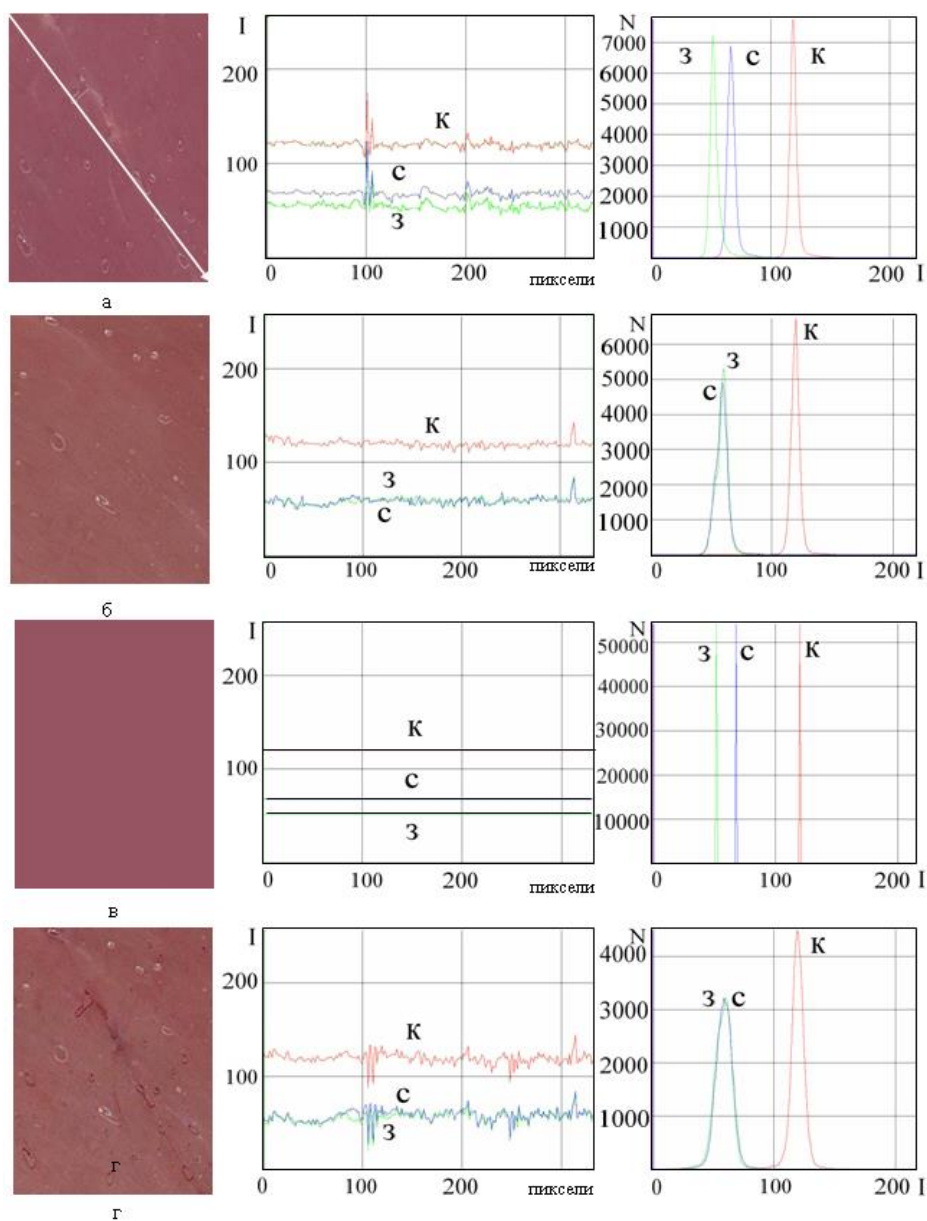


Рис. 3.4. Изображения, ПИ и ЯХ говядины наружной части тазобедренного отруба: а – охлаждённый свежий образец; б – после заморозки при температуре минус 18 °С и последующей разморозке при $t=14\div16$ °С; в – нулевой РК (а–а); г – РК, полученный вычитанием изображений б и а

При сравнении мясного сырья парного и после хранения в холодильнике выявлены изменения ЯХ, так же визуально не регистрируемые. У образцов говядины изменение максимумов ЯХ для разных каналов цветного изображения в процессе хранения оказалось различным: для красного ка-

нала число точек, имеющих практически близкие значения интенсивности, увеличивалось, а для зелёного и синего – уменьшалось.

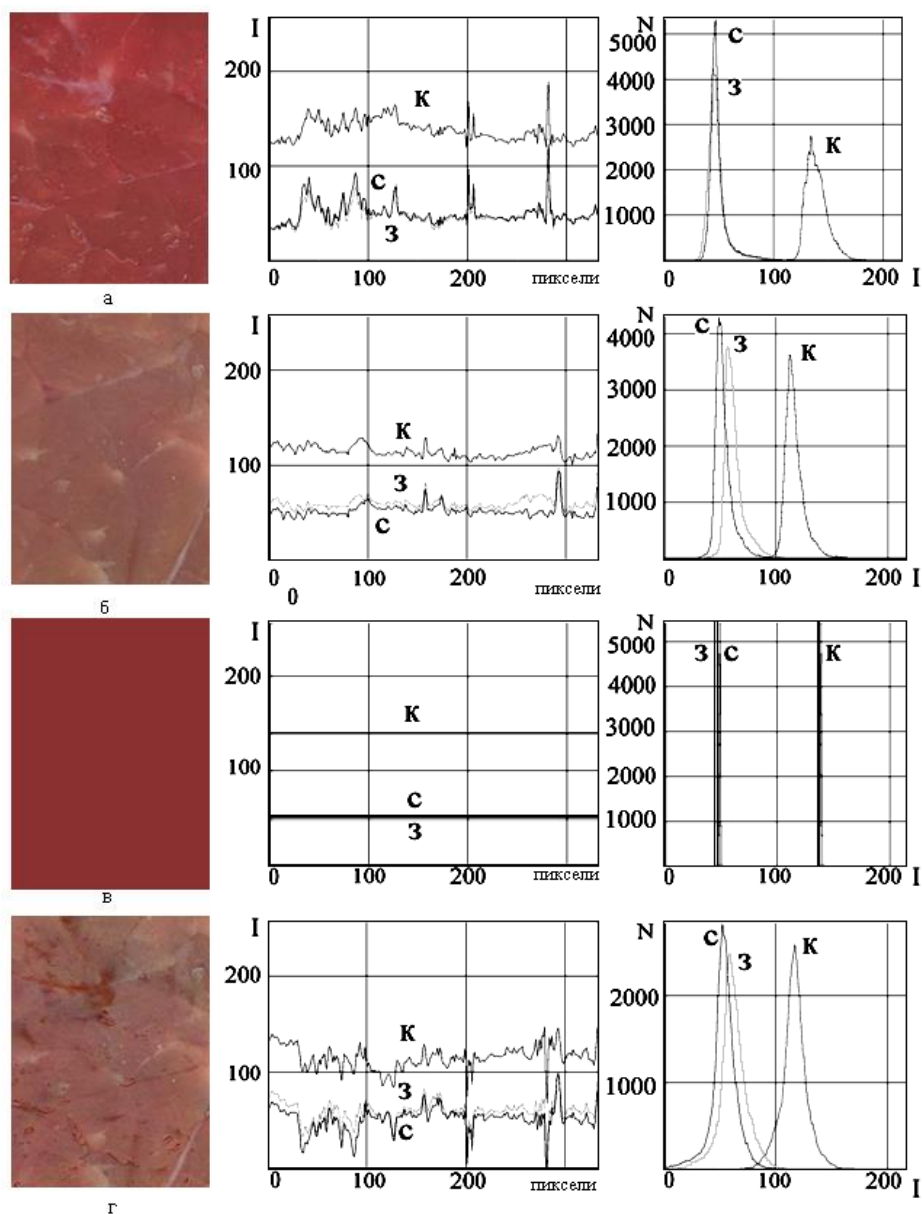


Рис. 3.5. Изображения, ПИ и ЯХ говядины наружной части тазобедренного отруба: а – парное мясо; б – после хранения в течение суток в холодильнике при температуре 4–6 °С и относительной влажности воздуха 75 %.; в – нулевой РК (а–а); г – РК, полученный вычитанием изображений (б–а)

3.3. Компьютерная диагностика качества мясной продукции

Регистрация цветовых характеристик мясопродуктов и их изменений методами цифровой обработки может эффективно использоваться для экс-

пресс-контроля соблюдения рецептур, режимов термической обработки и хранения мясопродуктов, т.е. для контроля их качества в процессе производства. Ниже будут представлены примеры цифровой обработки колбасных изделий разных видов и производителей.

В качестве объекта исследования мясных продуктов использовались колбасные изделия разных видов: колбаса варёная «Докторская» (ГОСТ Р 52196-2003), колбаса варёная «Молочная» (ГОСТ Р 52196-2003), колбаса варёная «Троицкая» (ТУ 9213-002-35744145-98) и колбаса варёно-копчёная «Сервелат Финский» (ТУ 9213-322-0159 7945-03); четырёх разных производителей (условно, **A**, **B**, **C** и **D**). Исследованию подвергались как свежие батоны колбас, так и хранившиеся в течение определённого времени:

- при оптимальных условиях, т.е. при температуре 4 °С и относительная влажность воздуха 75 %;
- при не оптимальных т.е. при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 80 %.

От исследуемого батона колбасы острым ножом отрезали образец толщиной ~ 10 мм и помещали в стеклянный контейнер. Для устранения контакта стекла и исследуемого образца между ними помещались узкие прокладки. Расстояние от стекла до продукта было постоянным и составляло 1 мм. Образцы практически полностью занимали весь объём стеклянного контейнера [196–201].

При исследовании колбасных изделий все образцы сканировались одновременно. Кюветы все время находились на сканере и не передвигались. Режимы сканирования не изменялись от эксперимента к эксперименту. Результаты сканирования для колбасы «Докторская» представлены на рис. 3.6. Для регистрации изменения цветовых характеристик сканирование образцов проводилось через каждый час в течение 24 часов при $t = 14 \div 16$ °С, влажности воздуха 85 %.



Рис. 3.6. Изображения колбасы варёной «Докторская» (ГОСТ Р 52196-2003) разных производителей

На рис. 3.7 в качестве примера представлены изображения образца колбасы производителя А: исходное и полученные при сканировании через 3, 6 и 9 часов. Как видно из рисунка, отличия в контрасте для человеческого взгляда не заметны, однако РК и ЯХ дают качественную и количественную оценку происшедших в исследуемом объекте изменений.

С течением времени уменьшается количество точек, имеющих максимальные значения интенсивности (отложено по оси ординат), но сама интенсивность в градациях серого цвета изменяется незначительно (отложена по оси абсцисс).

Аналогичные результаты были получены и для образцов колбас других производителей. При хранении наблюдалось изменение ЯХ и РК, причём скорости этих изменений у колбас, выпущенных разными производителями, заметно отличались друг от друга. Следует отметить, что исходные ЯХ для всех образцов колбас имели заметные отличия, что может быть связано с технологическими особенностями, рецептурой производства колбасы разными производителями и особенностями хранения.

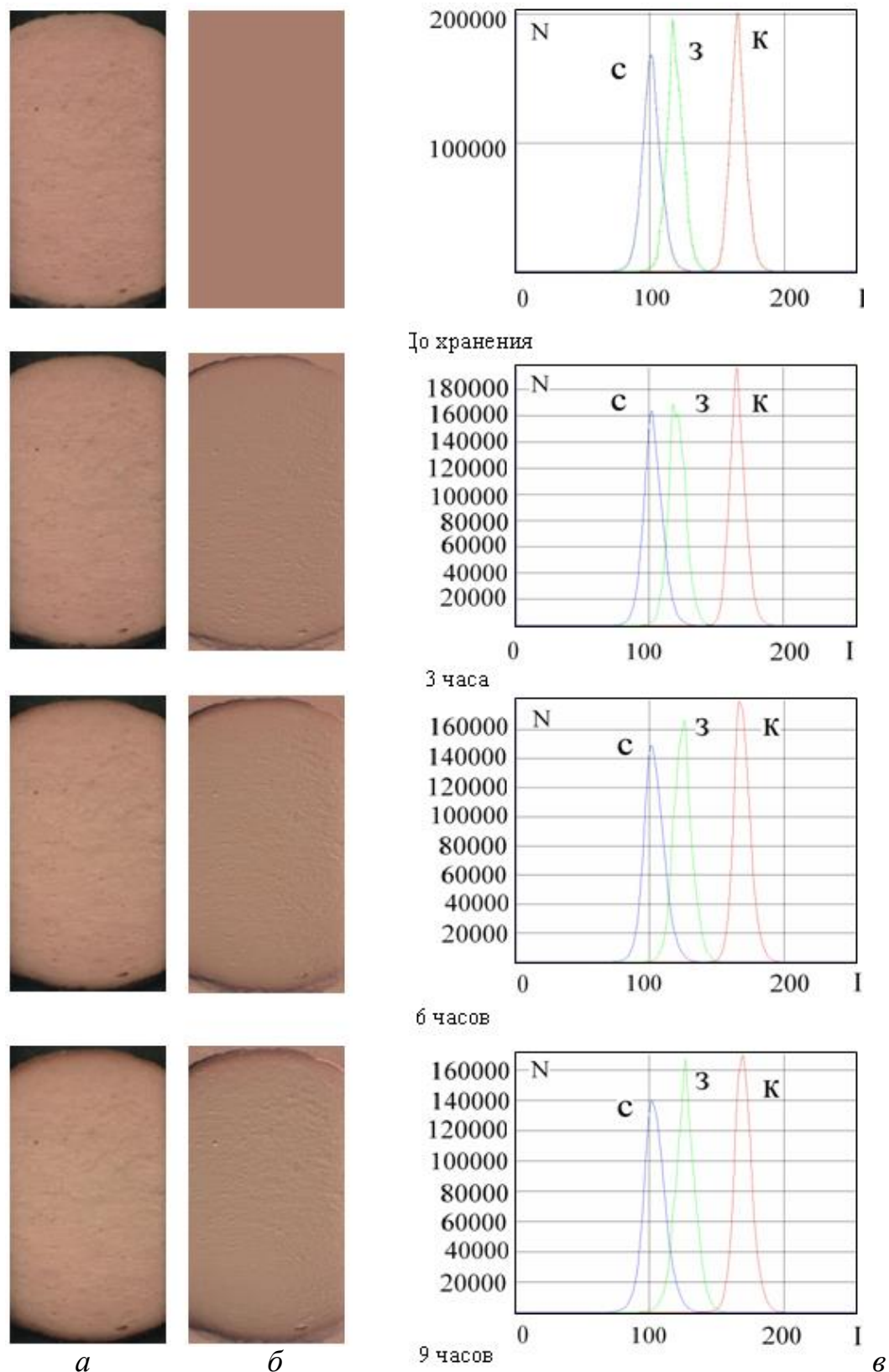


Рис. 3.7. Результат цифровой обработки изображений колбасы варёной «Докторская» производителя А: а – исходные, б – РК, полученный путём вычитания изображений после хранения и исходного; в – ЯХ

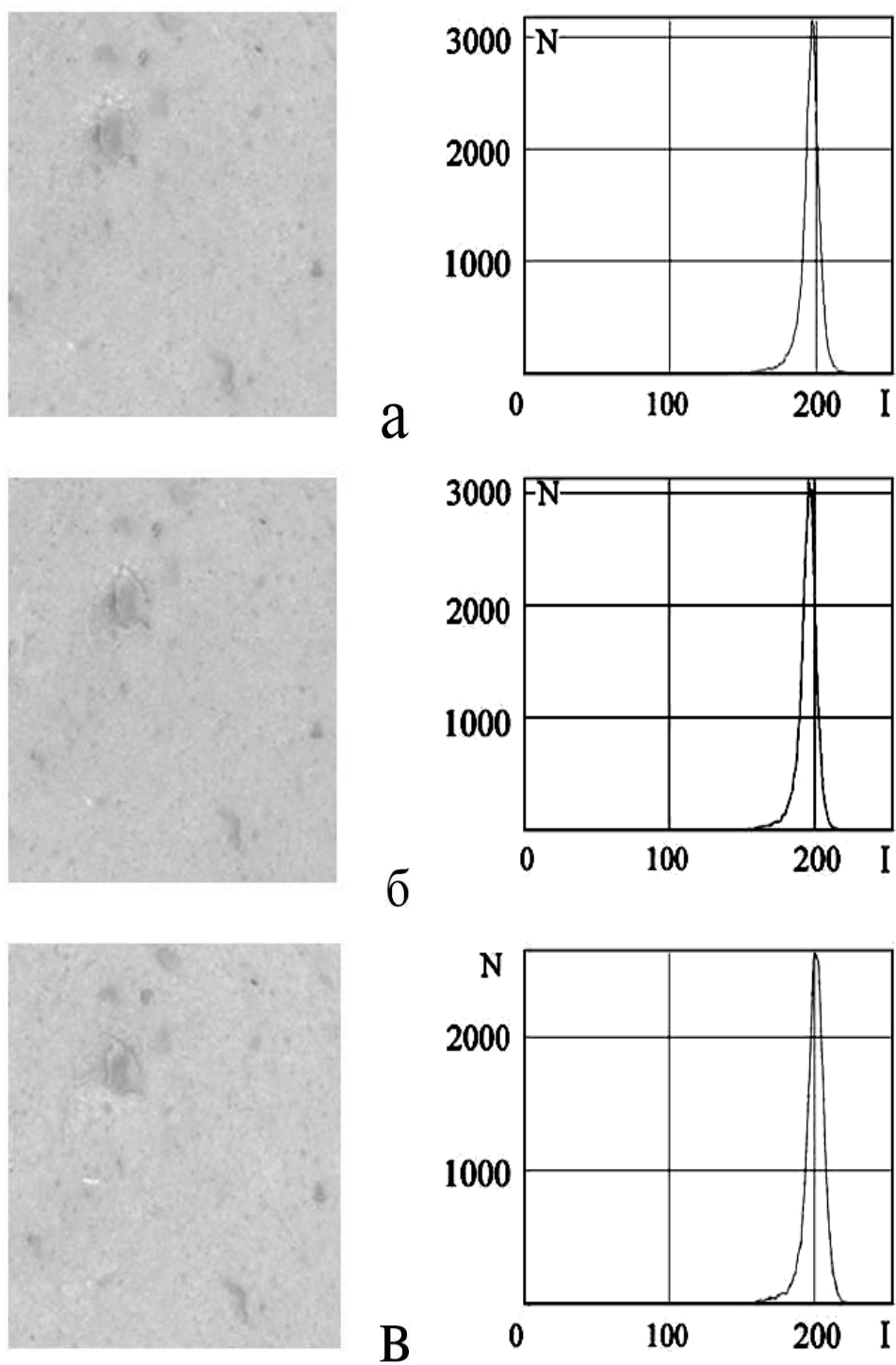


Рис. 3.8. Результат цифровой обработки образца колбасы варёной «Троицкая»: а – исходный образец; б и в – после хранения в контейнере при температуре 4 °С и относительной влажности воздуха 75% в течение 4 и 24 часов, соответственно

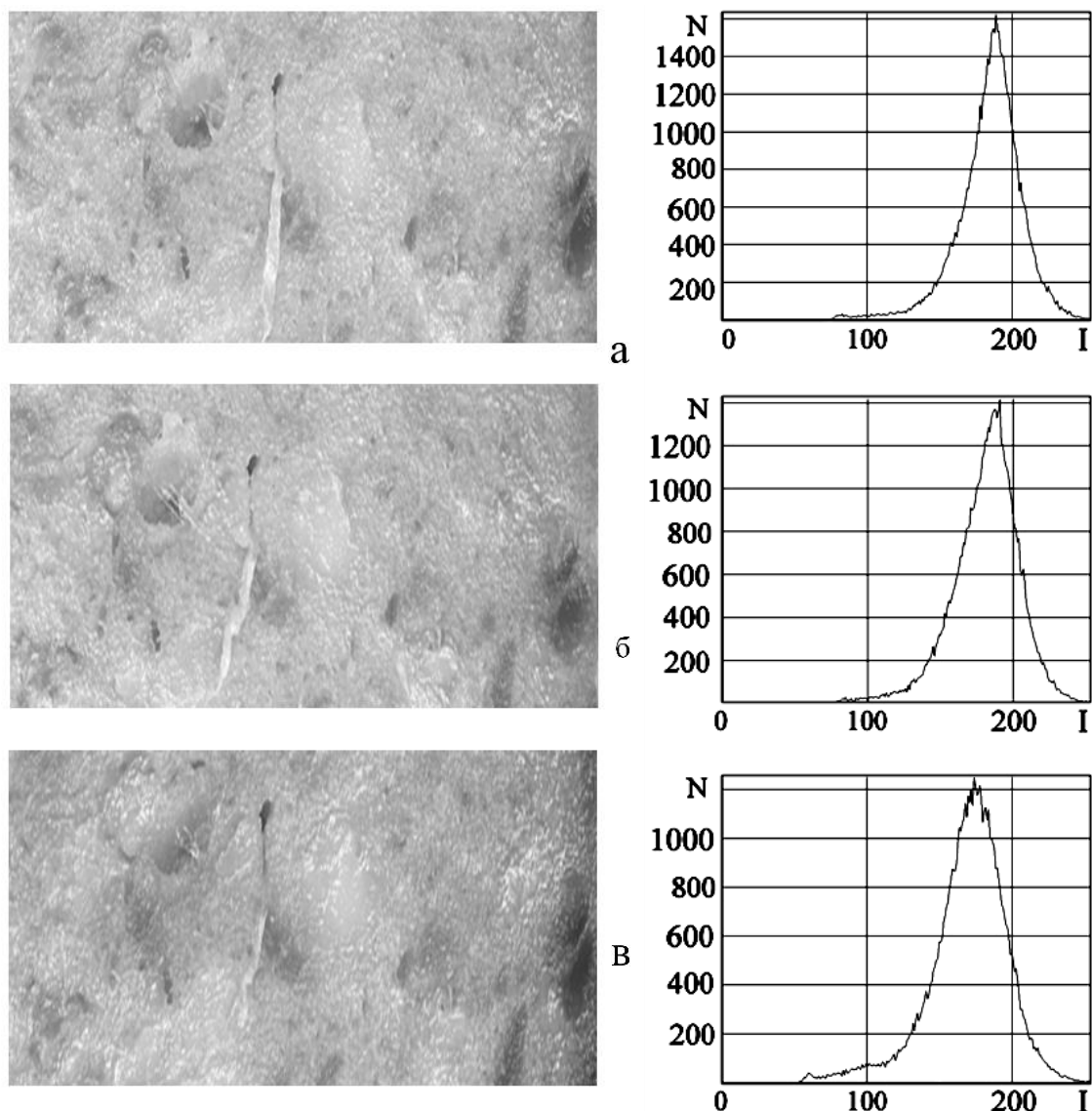


Рис. 3.9. Результат цифровой обработки образца колбасы варёно-копчёной «Сервелат Финский»: а – исходный образец, б и в – после хранения в контейнере при температуре 22 °С и относительной влажности воздуха 85% в течение 1 и 3 часов, соответственно

Как отмечалось ранее, цифровой обработке подвергались как цветные, так и чёрно-белые изображения. На рис. 3.8 представлены чёрно-белые изображения колбасы варёной «Троицкая»: а – исходное; б и в – после хранения в контейнере при температуре 4 °С и относительной влажности воздуха 75 % в течение 4 и 24 часов, соответственно, и построенные

для них ЯХ. Визуально изменение цвета исследуемых образцов оценить довольно сложно, однако ЯХ черно-белых изображений также надёжно фиксируют их отличие.

На рис. 3.9 представлены изображения колбасы варёно-копчёной «Сервелат Финский»: *а* – исходный образец, *б* и *в* – после хранения в контейнере при температуре 22 °С и относительной влажности воздуха 85 % в течение 1 и 3 часов и построенные для них ЯХ. Изменение ЯХ (рис. 3.9) свидетельствует о процессах, происходящих в исследуемых образцах с течением времени. Причём применяемые в данном опыте условия хранения способствовали резкому уменьшению максимальных значений ЯХ.

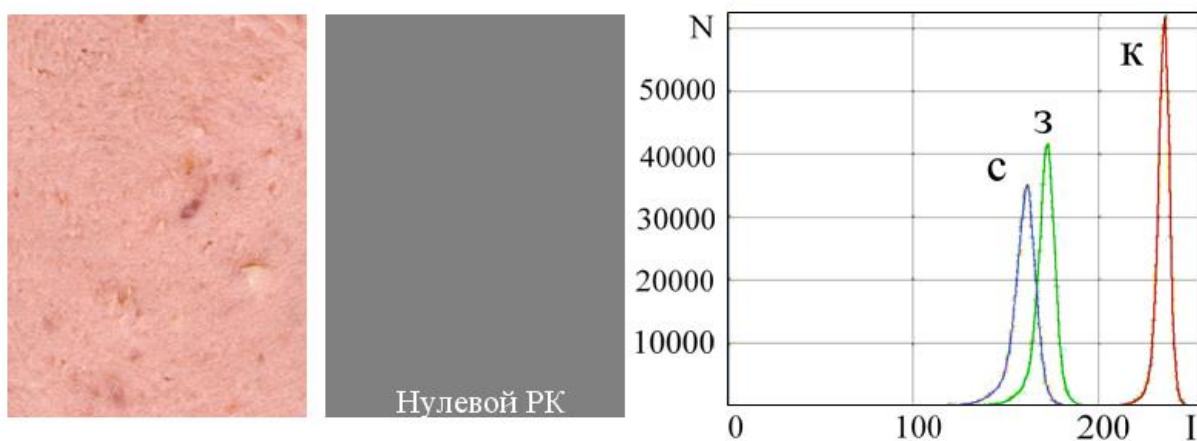
На примере колбасы варёная «Молочная» исследовалось влияние на качество условий хранения:

- хранении в течение 6 суток, при температуре 4 °С и относительной влажности воздуха 75 %;
- хранении в течение 6 суток при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 80 %.

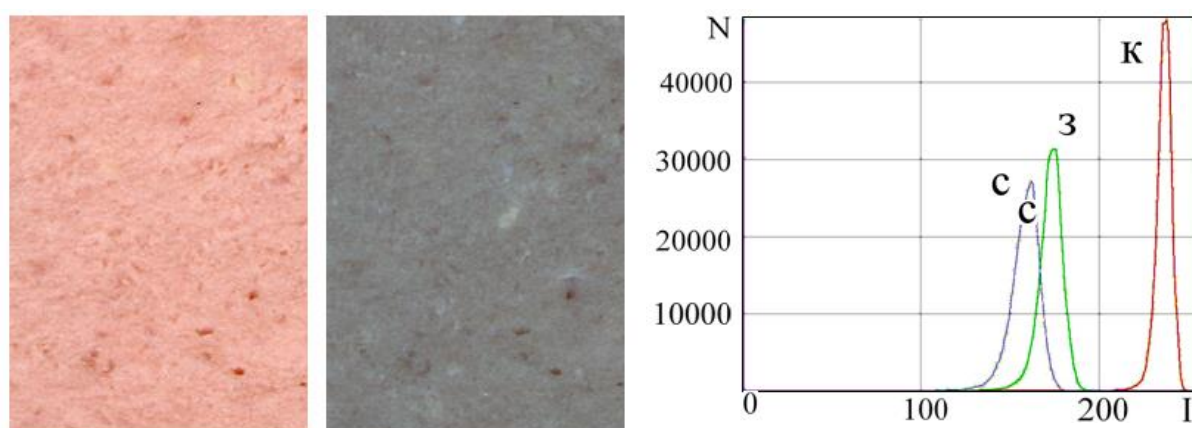
Через 6 суток исследуемые образцы повторно сканировались и для них строились РК и ЯХ.

Результаты исследования, приведенные на рис. 3.10, показывают, что условия хранения значительно влияют на изменение ЯХ, т.е. имеет место не видимое визуально изменение цветовых характеристик. Установлено, что хранение продукции при комнатной температуре способствует более интенсивному уменьшению количества точек с максимальной интенсивностью, чем хранение при оптимальных условиях.

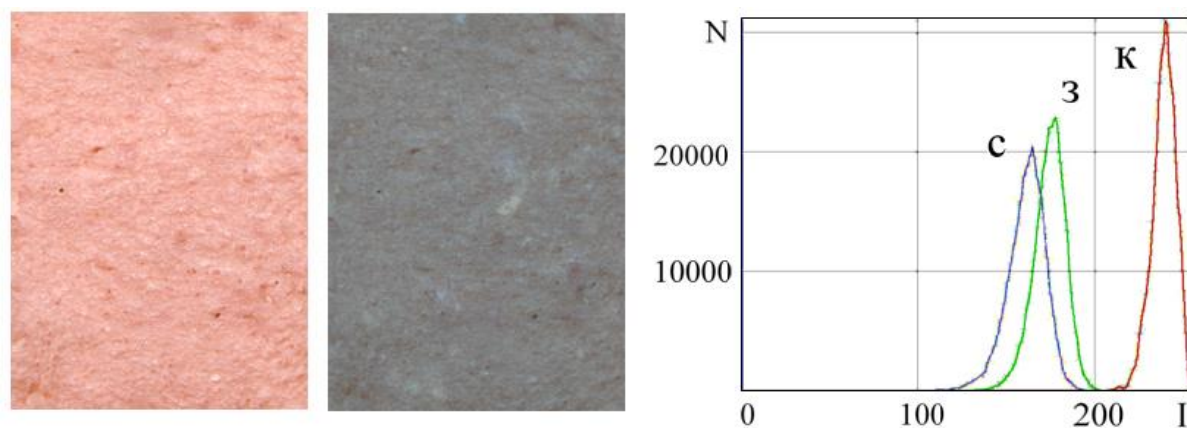
Таким образом разницу цветовых характеристик колбасных изделий и их изменение при воздействии различных факторов удастся просто и надёжно зарегистрировать по изменению цвета.



Исходный образец, взятый из свежего батона



Хранение в течение 6 суток при температуре 4 °С и влажности 75 %



Хранение в течение 6 суток при температуре 20 °С и влажности 80 %

a

б

в

Рис. 3.10. Цифровая обработка изображений колбасы варёной «Молочная»: *a* – исходные; *б* – РК, полученный вычитанием изображений колбасы после хранения и изображения образца, взятого из свежего батона; *в* – ЯХ

3.4. Компьютерная диагностика сухого и мокрого способов посола мяса

Для отработки методик визуализации процесса посола использовалось охлаждённое мясо цыплёнка-бройлера, вырезанное из грудной и бедренной мышц. Исследовались сухой и мокрый способы посола мяса смесью состава соль-перец-чеснок в соотношении 1:0,11:1. При мокром способе концентрация соли в рассоле составляла 12 %.

Для каждого эксперимента отбирались пять кусков мяса размером, примерно, 5×7 см и толщиной ~2 см, которые укладывали в стеклянные контейнеры. Далее один кусок мяса обсыпали по всему периметру посолочной смесью, а три других – компонентами смеси, т.е. отдельно солью, перцем и чесноком. Пятый кусок мяса был контрольным, и по нему оценивалось влияние на мясо внешних факторов. Все контейнеры с образцами сверху закрывались стеклом. При всех способах посола пропитка мяса проходила только со стороны боковой поверхности. В реальных условиях процесс посола идёт через всю поверхность. Сканирование мяса в течение первого часа проводили через каждые 15 мин, а далее – через каждые 30 мин. В промежутках между сканированием мясо находилось в холодильнике при температуре 4–6 °C [195–198, 202].

При посоле происходит изменение цвета мяса, фиксация которого человеческим глазом на начальном этапе затруднена. Сканирование и последующая цифровая обработка позволяют выявить даже незначительные изменения цвета, но визуально провести чёткую границу между пропитанными и непропитанными областями не представляется возможным.

Определение глубины проникновения смеси и её компонентов в мясо оценивали по снятым профилям интенсивности (ПИ) и областям равного контраста (ОРК).

Анализируемый контраст подвергался цифровой обработке как в чёрно-белом, так и в цветном вариантах. Последний является более наглядным и технически легко реализуемым.

3.4.1. Модель процесса посола и методики его исследования

Методика, основанная на анализе областей равного контраста и профилей интенсивности [198]. Скорости процесса посола мяса смесью и её отдельными компонентами по различным направлениям будут отличаться друг от друга [203], поэтому анализируемый контраст должен отражать эти обстоятельства. На рис. 3.11 демонстрируется используемый подход (модель) к визуализации процесса посола и определение его количественных характеристик. Арабскими цифрами показаны четыре направления, по которым снимались ПИ, включая направления вдоль волокон мышечной ткани и перпендикулярно к ним.

В идеальном случае для данного изображения мяса ПИ имеют вид, представленный на рис. 3.11, в: 1 – исходный, 2–4 – для различного времени посола t , причём $t_1 < t_2 < t_3$ и $l_1 < l_2 < l_3$, где l – глубина посола. Увеличение времени посола приводит к изменению контраста и ПИ. Сопоставляя изображения ОРК в чёрно-белом или цветном вариантах, полученные для разных уровней гаусс-размытия, с построенными ПИ и, зная размеры образца мяса, удаётся достаточно надёжно определить глубину проникновения посолочной смеси, а также оценить глубину проникновения каждого её компонента в отдельности. Зная время посола (t_n) и глубину проникновения (l_n) легко оценить скорость процесса:

$$v = l_n / t_n.$$

В основу предлагаемой модели изменения экспериментального контраста положены следующие предпосылки. При построении ОРК необходимо выбрать оптимальное число градаций цвета. До посола анализируемый контраст обусловлен в основном мясом и соединительной тканью, так что при построении ОРК имеем две градации цвета. В процессе посола добавляется контраст, создаваемый компонентами посолочной смеси, условно **А**, **В** и **С**. Так как смесь трёхкомпонентная, то построенные в этом случае ОРК состоят из пяти разноцветных областей (рис. 3.11, г). Первая об-

ласть имеет контраст, создаваемый в мясе компонентами **A**, **B** и **C**. Контраст во второй области создаётся компонентами **B** и **C**, а в третьей области – только компонентом **C**.

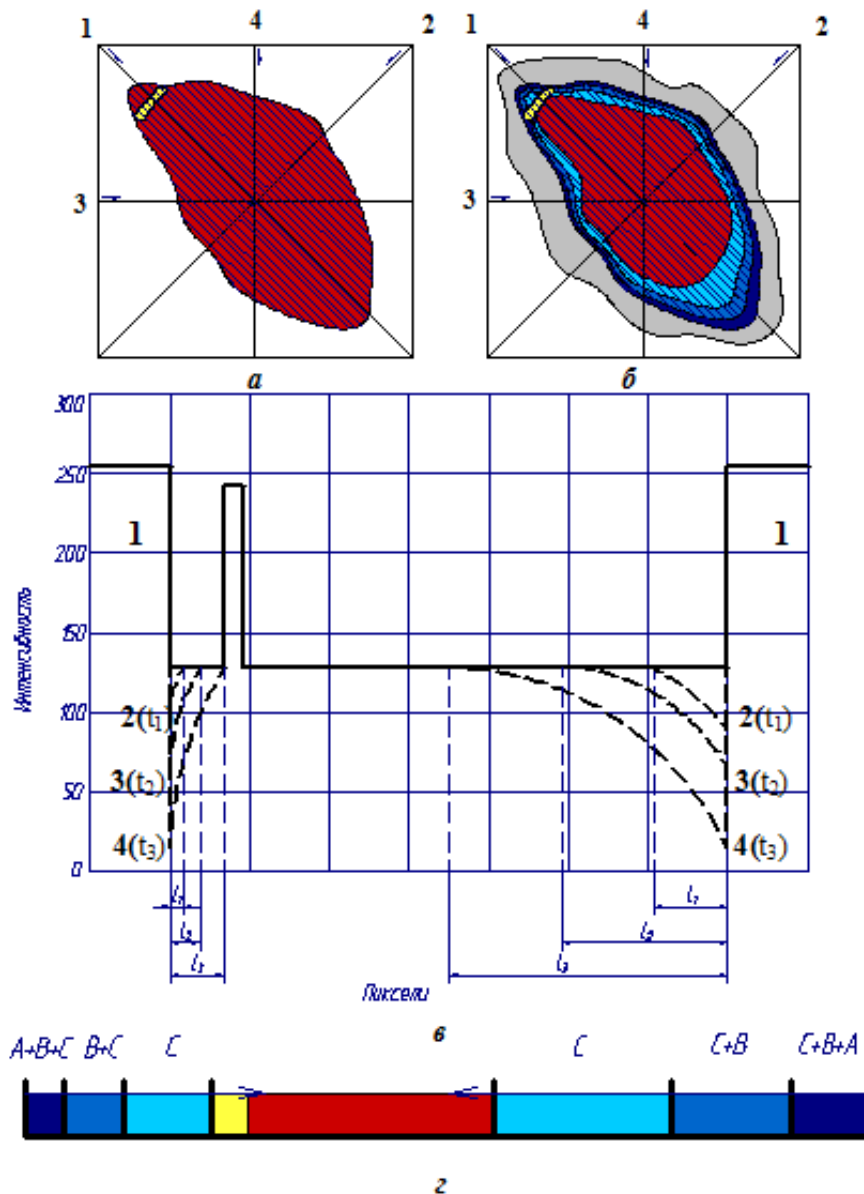


Рис. 3.11. Схема визуализации процесса посола мяса смесью, состоящей из трех компонент **A**, **B** и **C**: *а* – исходное просканированное изображение, римскими цифрами показаны направления снятия профилей интенсивности; *б* – после посола в течение некоторого времени; *в* – профили интенсивности (*1* – исходный, *2–4* – после посола в течение времени $t_1 < t_2 < t_3$, l_1, l_2, l_3 – глубина посола); *з* – изменение контраста при пяти градациях цвета

Четвёртая и пятая области соответствуют соединительной ткани и мясу. Таким образом, в идеальном случае анализируемое изображение представляет собой ОРК, состоящие из пяти разноцветных или чёрно-белых областей (5 градаций цвета). Линии, разделяющие эти области, можно условно связать с глубиной проникновения смеси и её компонентов. Увеличение числа градаций цвета позволяет более детально оценить изменение контраста связанного с проникновением в мясо компонент посочной смеси.

По изменению контраста и по снятым ПИ можно судить об изменении концентрации смеси и её компонентов по глубине и определить скорости их проникновения.

Методика, основанная на разложении изображения по цветовым каналам (красный, зелёный, синий) [198]. Данная методика основана на разложении цветного изображения мяса (или любого другого объекта исследования) на составляющие – красный, зелёный и синий каналы и представление их в градациях серого цвета от 0 до 255 (рис. 3.12). Далее строятся ОРК и ПИ, по которым возможно определение количественных характеристик процесса посола, например: глубины проникновения смеси и её компонентов, скорости процесса и т.д.

Идея разложения изображений на каналы основана на том, что при посоле наибольшие изменения цветовых характеристик могут наблюдаться в одном из каналов RGB-изображения. Используя для анализа и обработки изображение того цветового канала, который дает наиболее полную информацию, удаётся получить более надежные данные о процессе посола. Разложение изображений на красный, зелёный и синий каналы проводилось в программах «Adobe Photoshop», «Matlab» или «Mathcad».

Этот подход является весьма эффективным не только при исследовании посола мяса, но и большого круга других материалов и веществ.

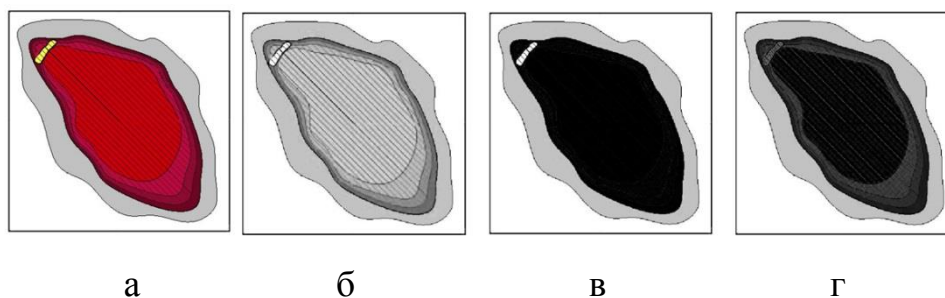


Рис. 3.12. Модель разложения исходного изображения мяса цыплёнка-бройлера (а), подвергнутого посолу, по цветовым каналам – красный (б), зелёный (в) и синий (г), представленная их в градациях серого цвета

Методика, основанная на регистрации разностного контраста [198]. Данная методика расширяет возможности представленных выше методики, обладает большей наглядностью и основывается на построении и анализе разностного контраста, полученного вычитанием двух изображений, например, исходного и после посола.

Если изменений яркости цвета мяса нет, то имеем нулевой РК, а ПИ представляют собой прямую линию (рис. 3.13, профиль 1). При посоле концентрация компонентов смеси убывает по мере удаления от поверхности вглубь мяса. Построенный РК отражает это обстоятельство изменением цвета и, соответственно, ПИ (рис. 3.13, профили 2–6).

Для определения количественных характеристик необходимо построение ОРК и ПИ.

Применение гаусс-размытия РК позволяет уменьшить влияние на построенные ОРК и ПИ границ между волокнами мышечной ткани и, следовательно, повысить точность методики и надежность полученных результатов.

По предлагаемой методике последовательно записывается РК между исходным изображением и изображениями мяса при различном времени посола. По изменению РК можно судить о динамике процесса, об особенностях проникновения смеси и её компонентов в мясо. Можно записать

РК, например, между двумя изображениями мяса при разном времени посола, оценить изменения цветовых характеристик и определить количественные характеристики процесса за какой-то выбранный отрезок времени.

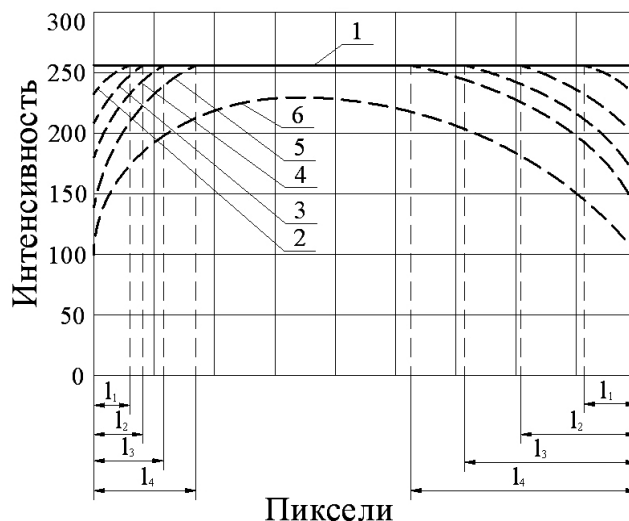


Рис. 3.13. Профили интенсивности и их изменение при посоле, регистрируемое по третьей методике: 1 – при нулевом разностном контрасте (интенсивность равна 255); 2–6 – после посола в течение времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5 < t_6$, $l_1 - l_4$ – глубина посола (модельное представление)

Возможно применение комбинированной методики, включающей в себя элементы рассмотренных выше трех методик.

3.4.2. Экспериментальное исследование процесса посола

Реальный экспериментальный контраст, получаемый при использовании методики, основанной на анализе ОРК и ПИ, имеет более сложный вид, и его расшифровка требует навыка, но рассмотренные выше закономерности в целом сохраняются. На рис. 3.14 в качестве примера приведены ПИ для исходного и размытых изображений мяса цыплёнка-бройлера, демонстрирующие устранение флуктуаций интенсивности, обусловленные границами между волокнами мышечной ткани [196–198, 204, 205].

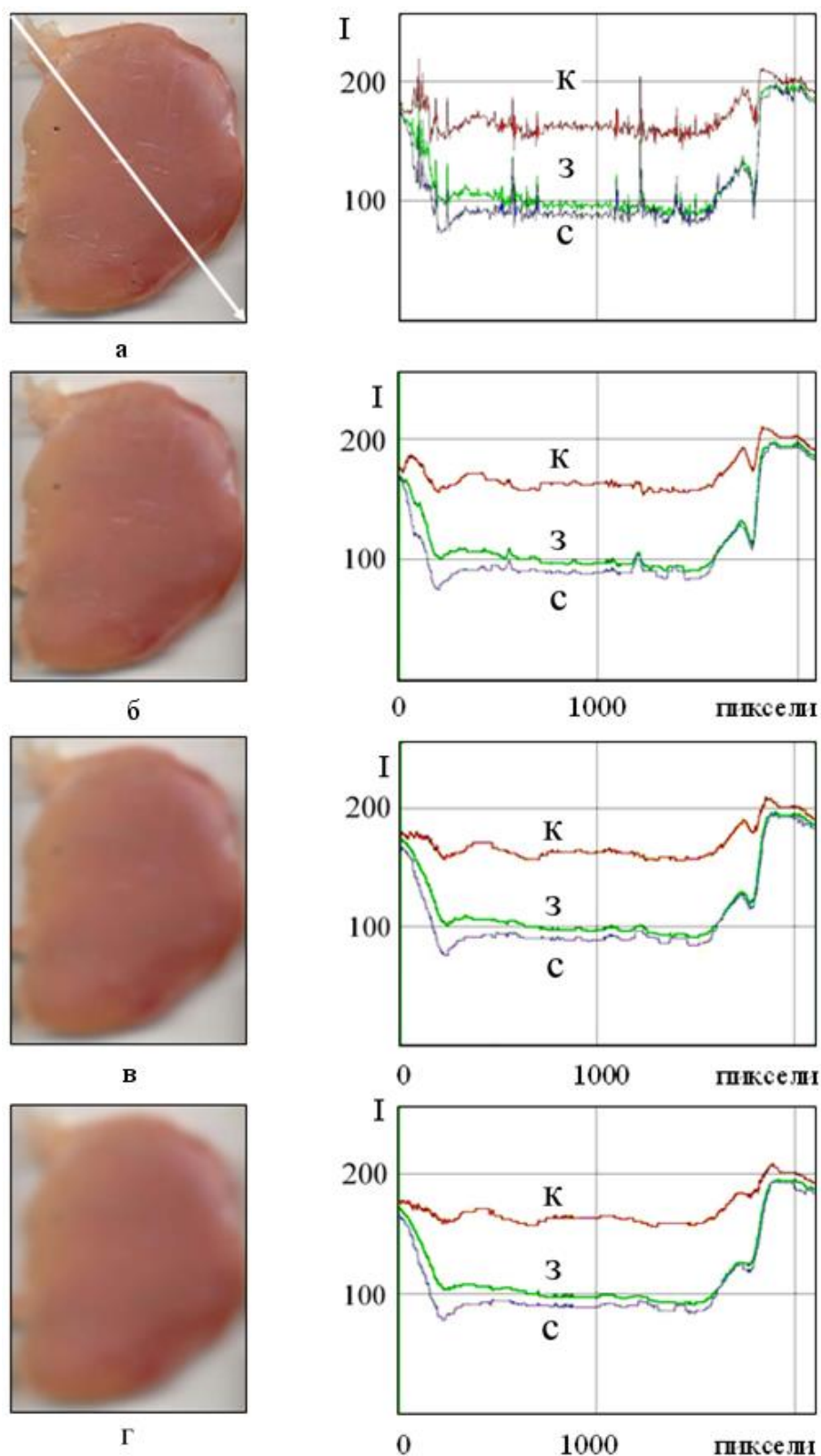


Рис. 3.14. Устранение флуктуаций интенсивности при построении профилей: а – исходное изображение мяса и ПИ для него; б, в и г – изображение мяса и ПИ после гаусс-размытия (соответственно радиусы размытия б – 10, в – 20, г – 30 пикселей): З, С и К – зеленая, синяя и красная компоненты цвета соответственно

Используя предложенную выше методику, цветное изображение мяса было разложено на каналы – синий, зелёный и красный и представлено в градациях серого цвета от 0 до 255. Рис. 3.15 соответствует исходному изображению, а рис. 3.16 – изображению мяса, подвергнутому посолу.

В целях экономии времени цифровой обработке можно подвергать не всё изображение, а только его часть. Для этого на исходном изображении необходимо вырезать интересную для анализа область в виде полосы. Примеры такой обработки представлены на рис. 3.15,а и 3.16,а. Отдельно в увеличенном виде вырезанная полоска представлена на рис. 3.15,б и 3.16,б.

Для каждой компоненты при 5 градациях цвета были построены ОРК в чёрно-белом (рис. 3.15,г и 3.16,г) и цветном (рис. 3.15,д и 3.16,д) вариантах. При представлении ОРК в цвете белому цвету соответствует красный, а чёрному – фиолетовый цвет. Другим оттенкам серого цвета соответствуют цвета, лежащие в промежутке между красным и фиолетовым цветами.

Согласно предложенной модели, из 5 выбранных градаций цвета 3 градации соответствуют трём компонентам смеси – соли, перцу и чесноку, а две, соответственно, мясу и соединительной ткани.

На рис. 3.17,а и 3.18,а построены по центру слева направо ПИ. При разложении цветного изображения мяса по цветовым каналам и представлении их в градациях серого цвета от 0 до 255 имеет место кажущаяся потеря информации. Детали изображения, хорошо видимые на цветном рисунке, плохо различимы (рис. 3.16,в) или совсем неразличимы (рис. 3.15,в) в чёрно-белом виде. Глазом практически не определяется изменение контраста мяса при посоле. Картина резко меняется при построении ОРК. То, что не зафиксировал глаз человека, хорошо сделал компьютер. Сопоставление ОРК исходного изображения мяса (до посола) и после посола свидетельствует о возможности надежной регистрации изменений цвета мяса при проникновении в него водорастворимых компонент посолочной смеси, определения глубины и скорости их проникновения в мясо.

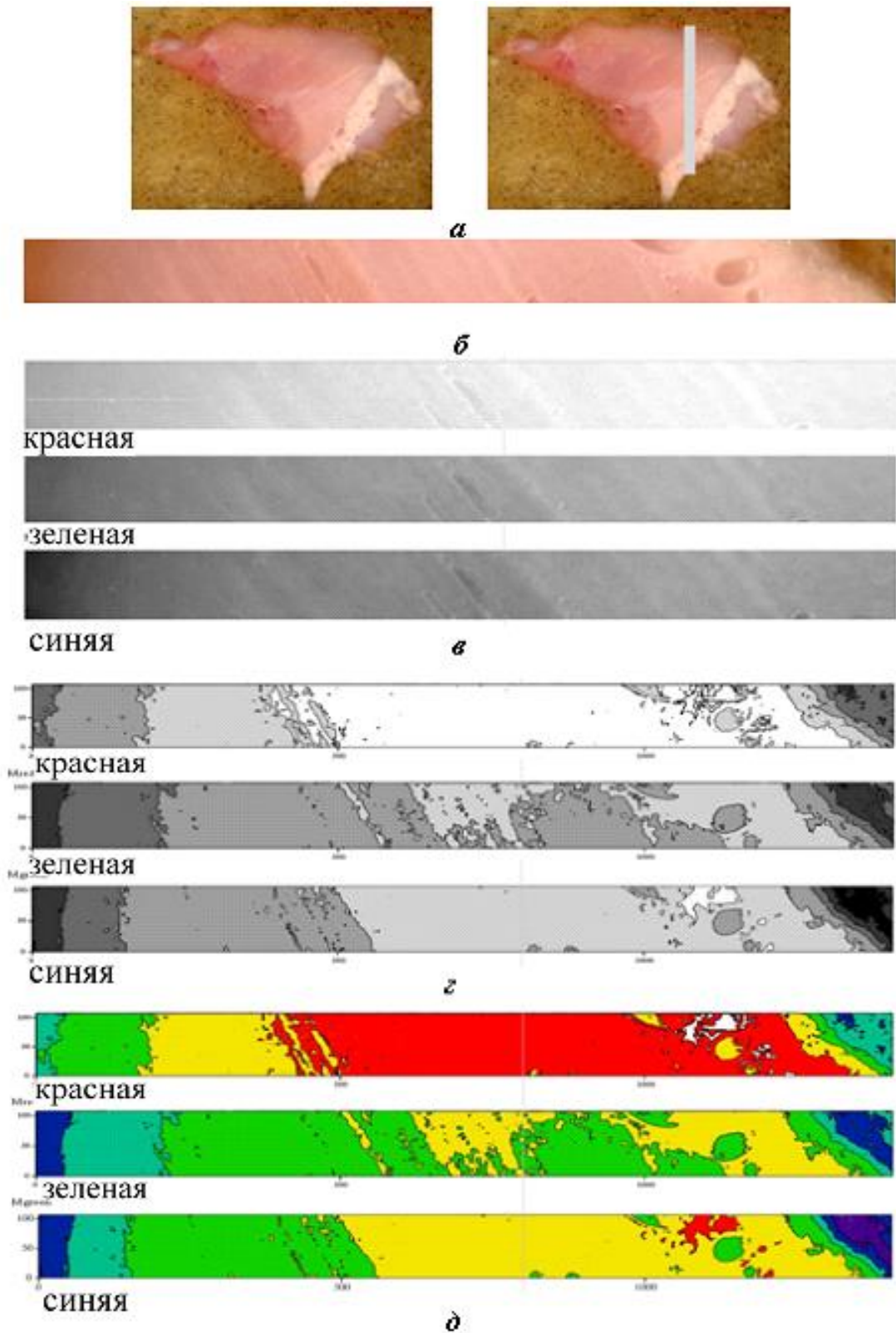


Рис. 3.15. Разложение изображения по цветовым каналам (компонентам):
 а – исходное изображение; б – вырезанная полоска; в – разложение
 цветного изображения по каналам и представление их в градациях серого
 цвета от 0 до 255; г и д – области равного контраста в чёрно-белом и
 цветном вариантах при 5 градациях цвета

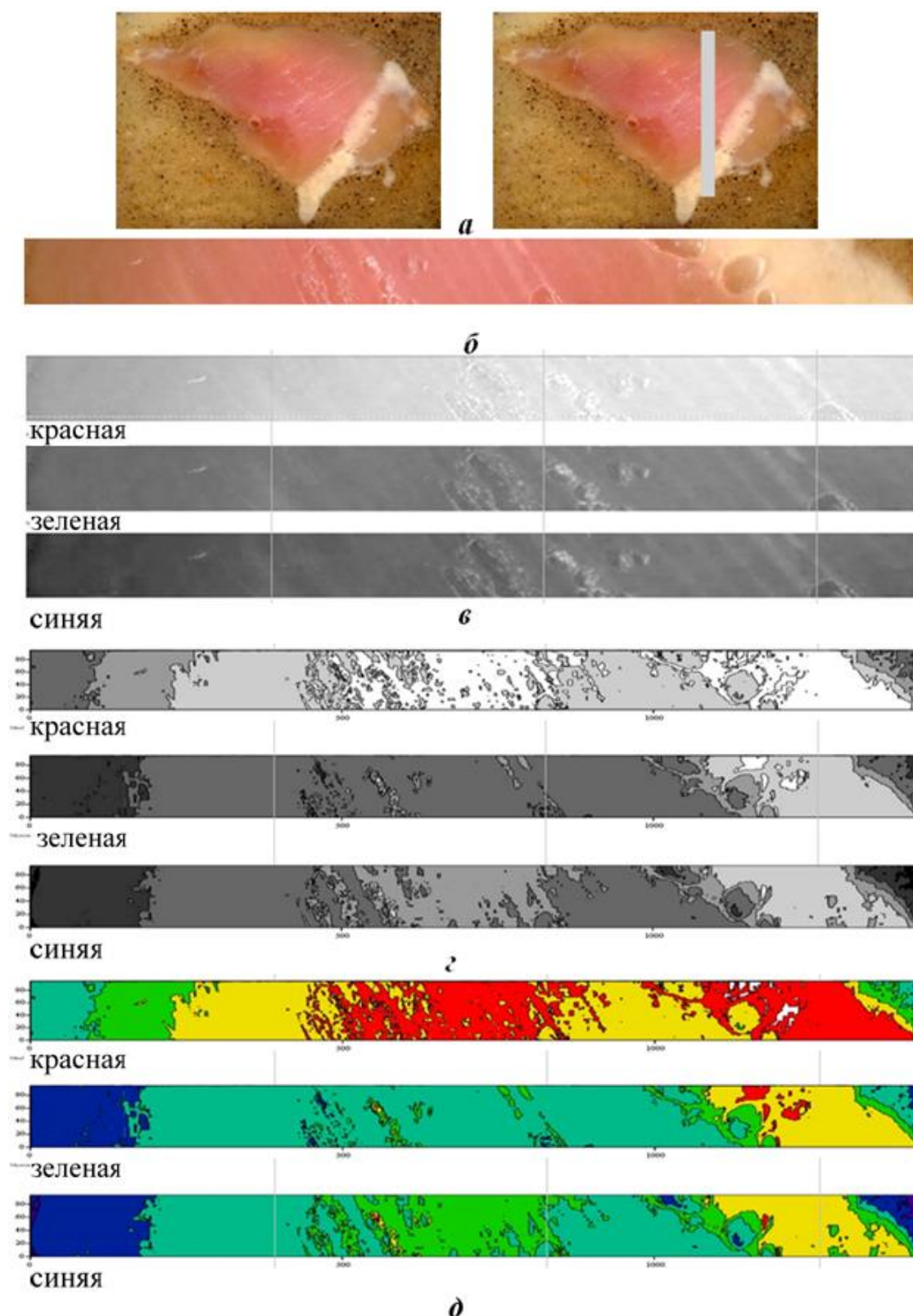


Рис. 3.16. Разложение изображения по цветовым каналам (компонентам):
 а – мокрый посол в течение 1050 мин.; б – вырезанная полоска;
 в – разложение цветного изображения по каналам и представление их в
 градациях серого цвета от 0 до 255; г и д – области равного контраста в
 чёрно-белом и цветном вариантах при 5 градациях цвета

Так как сканирование исходного изображения и предварительная цифровая обработка программным обеспечением сканера требуют некоторого времени, а мясо цыплят-бройлера находилось в контакте со смесью, то на исходном изображении при построении ОРК фиксируется тонкий слой, в который произошло проникновение посолочной смеси (рис. 3.15, г и д).

При увеличении времени посола мяса размер этих областей увеличивается. Экспериментальный контраст заметно изменяется, и по нему, зная размеры мяса или размер пикселя, можно проводить оценку глубины проникновения смеси и её отдельных компонент. Более точное определение глубины проникновения смеси и её компонентов лучше проводить при сравнении исходных профилей с профилями, снятыми после посола (рис. 3.17, а и 3.18, а). Более наглядная картина визуализации процесса посола наблюдается при обработке не полосы, а всего изображения исследуемого образца мяса.

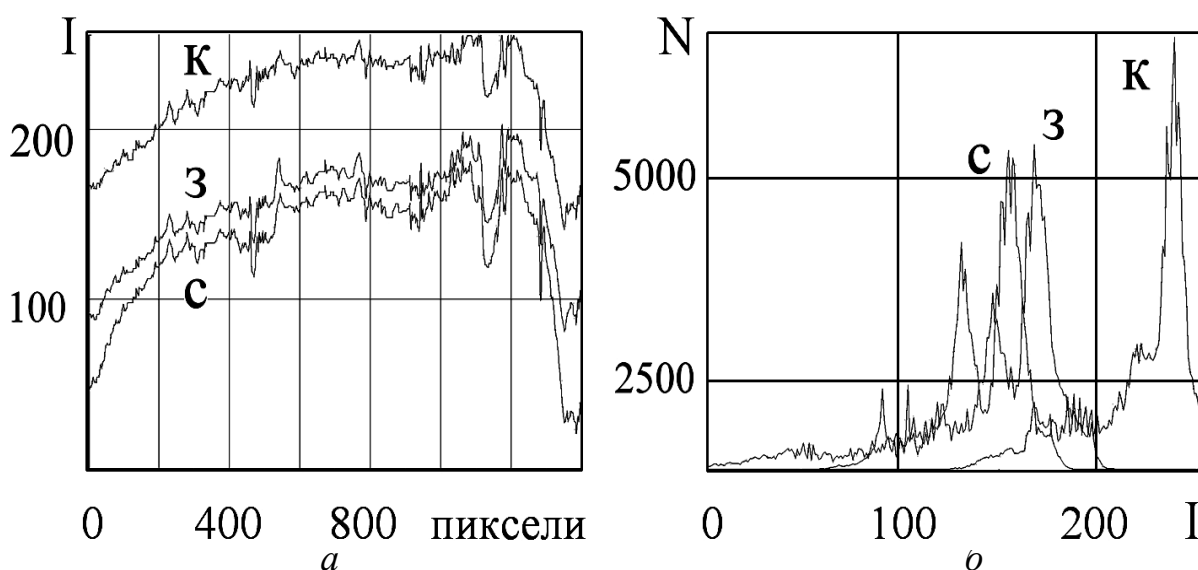


Рис. 3.17. Профили интенсивности (а) и яркостные характеристики (б) для красного, зелёного и синего каналов в градациях серого цвета от 0 до 255 для исходного изображения мяса цыплёнка-бройлера.

Примеры цифровой обработки по методике, основанной на регистрации РК, представлены на рис. 3.19.

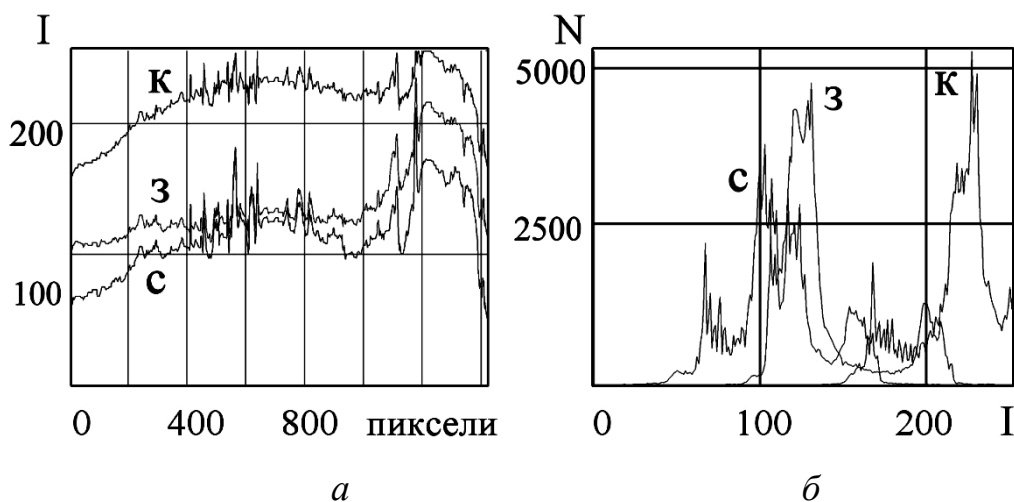


Рис. 3.18. Профили интенсивности (а) и яркостные характеристики (б) для красного, зелёного и синего каналов в градациях серого цвета от 0 до 255 для изображения мяса цыплёнка-бройлера после посола смесью состава соль-перец-чеснок в течение 1050 мин

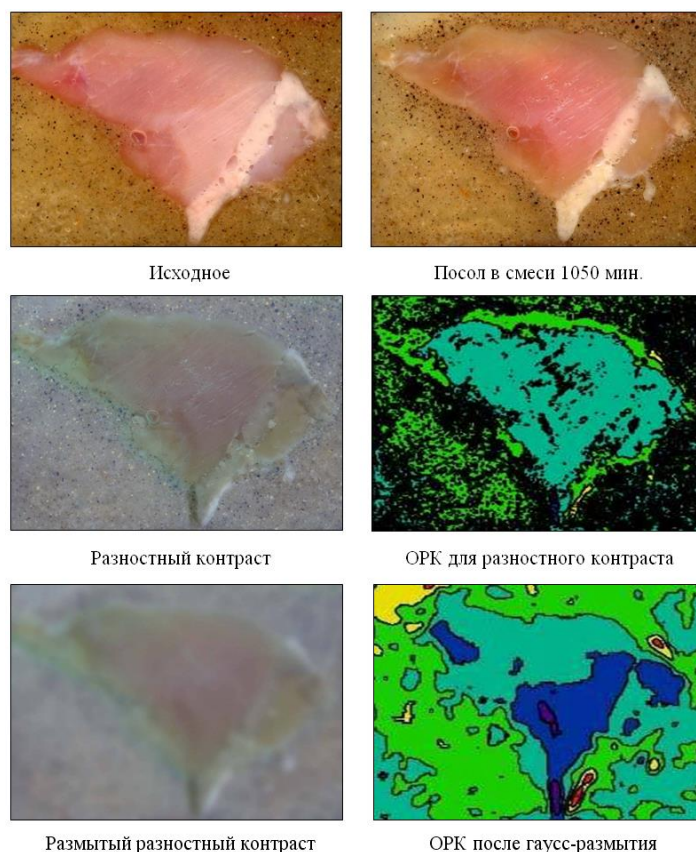


Рис. 3.19. Цифровая обработка изображения мяса цыплёнка-бройлера по методике, основанной на анализе разностного экспериментального контраста, полученного вычитанием двух изображений – исходного и после посола. Радиус размытия 10 пикселей. ОРК построены для 5 градаций цвета

При применении комбинированной методики для оцифрованных изображений строятся РК и проводится разложение контраста на красный, зелёный и синий каналы в градациях серого цвета от 0 до 255. Для каждого канала строятся ОРК. Примеры цифровой обработки изображений по данной методике представлены на рис.3.20.

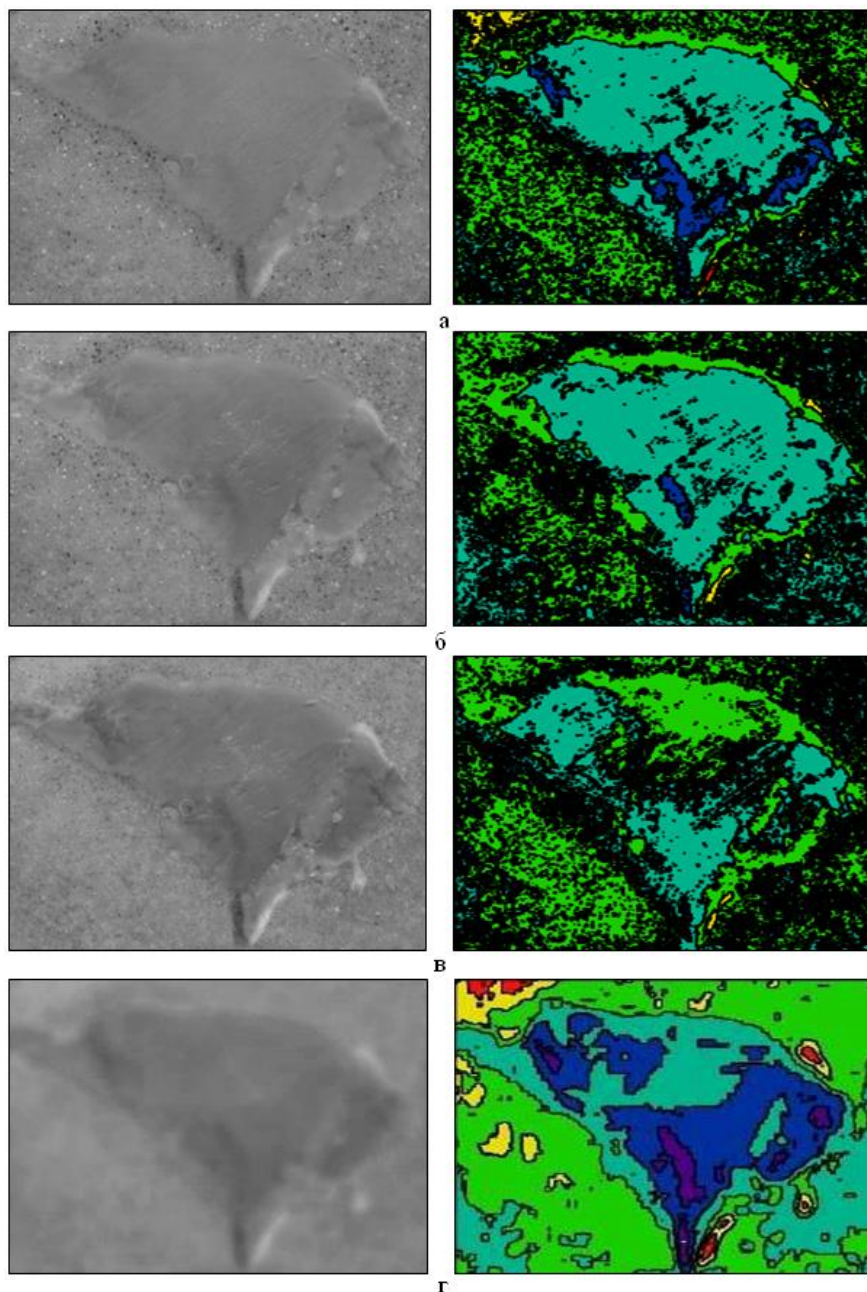


Рис. 3.20. Цифровая обработка изображения мяса цыплёнка-бройлера, представленного в градациях серого цвета, по комбинированной методике (справа) и построенные ОРК (слева): а – красный канал; б – зелёный канал; в – синий канал; г – синий размытый канал (радиус гаусс-размытия 10 пикселей)

Кажущееся на первый взгляд усложнение методики и увеличение времени цифровой обработки оказываются незначительными. Выигрыш заключается в более объективной и достоверной регистрации изменений цветовых характеристик мяса при посоле, а, следовательно, полученные количественные параметры процесса являются более точными и объективными [191, 206–209].

В таблице 3.1 представлены экспериментально определенные скорости посола для сухого и мокрого способов.

Таблица 3.1

Скорость посола для различных компонентов смеси, полученная из анализа областей РК и ПИ, выраженная в см/час

Способ посола Компонент смеси	Сухой		Мокрый	
	вдоль волокон	перпендикулярно волокнам	вдоль волокон	перпендикулярно волокнам
Соль	8-13	6-11	5-9	4-6
Перец	0,02-0,035	0,015-0,025	0,1-0,18	0,06-0,08
Чеснок	0,06-0,11	0,04-0,09	0,18-0,35	0,11-0,23

В результате проведенных исследований процесса посола удалось провести его визуализацию, определить глубину проникновения посолочной смеси в мясо и отдельно для каждой ее компоненты, определить скорость процесса для разных видов посола и отдельно для каждой ее компоненты.

Полученные экспериментальные результаты не противоречили известным литературным данным.

3.5. Компьютерная диагностика качества пива

Интересным объектом для исследования и проверки применимости рассмотренных выше цифровых методик является пиво: экспресс-диагностика его качества, процесса старения, регистрация и идентификация без применения специальных красителей частиц различной физико-химической природы, содержащихся в пиве.

Оптимизация всех стадий производства пива, обеспечение его прозрачности, коллоидной стабильности, вкусовых и цветовых качеств требуют тщательного контроля и регистрации частиц, присутствующих в пиве, установления их физико-химической природы [210–216].

Объектом исследования было выбрано пиво «Жигулёвское», светлое, без консервантов, пастеризованное, экстракт начального сусла 11%, не менее 4,0% оборотов этилового спирта, выпускаемое в России одним из производителей пива.

Пиво в количестве 10–20 мл наливалось в стеклянную кювету, которую устанавливали на планшетный сканер «Epson Perfection 4870 Photo». Одновременно можно было сканировать шесть кювет с пивом, что давало возможность одновременно сравнивать шесть сортов пива или шесть проб пива с различной предысторией. Последующая обработка отсканированных изображений позволяла провести статистический анализ, оценить изменение цвета и количество частиц, содержащихся в пиве, работу фильтров по его очистке и влияние других факторов.

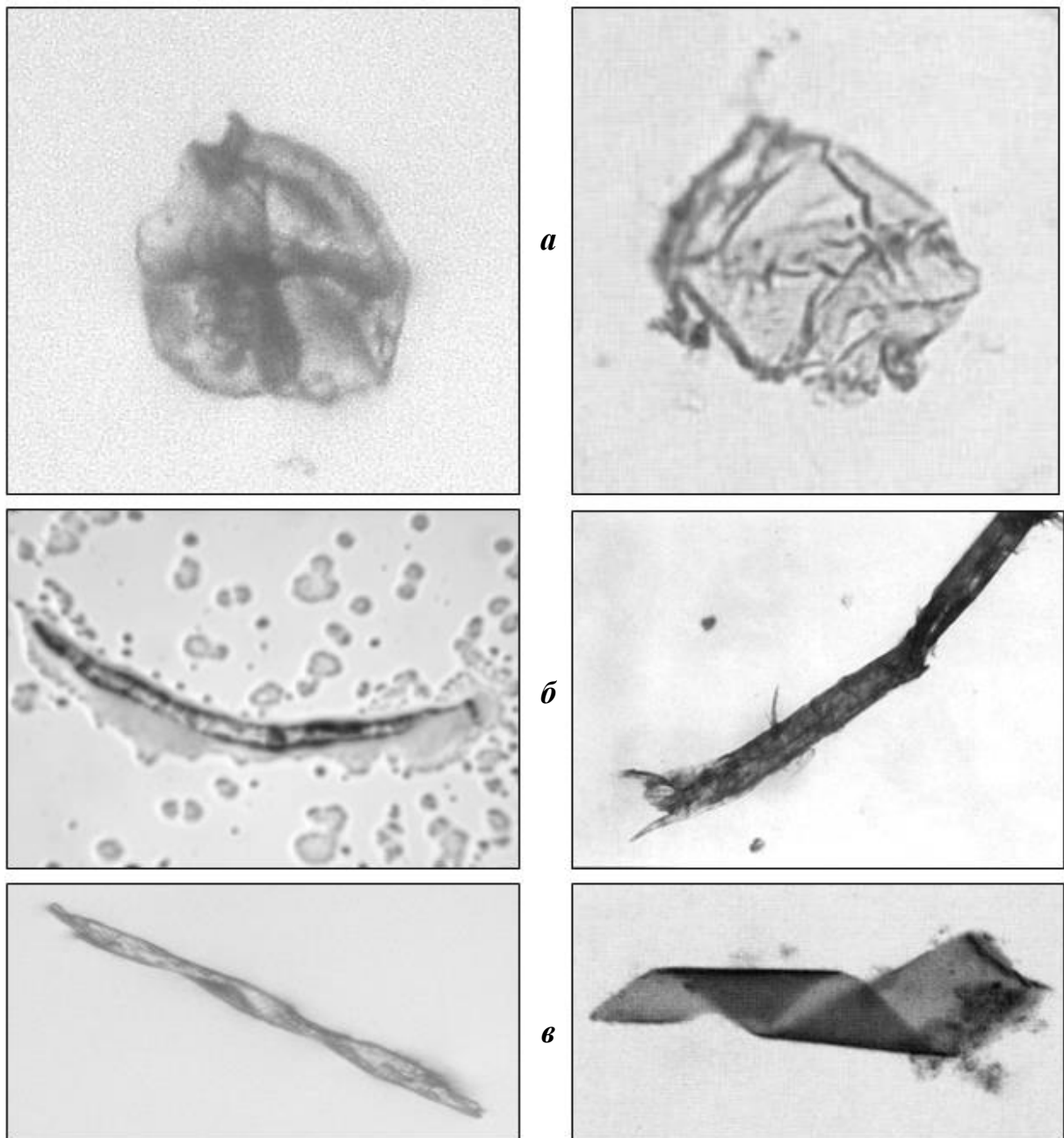
Пиво исследовалось также под микроскопом, снабжённым специальной насадкой и системой линз, а в качестве регистрирующего (оцифровывающего) устройства использовался цифровой фотоаппарат «Olympus Camedia C-5060». Оцифрованные изображения с необходимым для анализа увеличением в соответствии с поставленными задачами подвергались цифровой обработке.

Преимуществом изображений, полученных цифровым аппаратом, которое не достигается при использовании сканера, является их более вы-

сокая чёткость, возможность регистрации частиц при большом увеличении и определение физико-химической природы частиц. Это даёт возможность провести более детальный анализ физико-химической природы осадка и изменений, происходящих в пиве. При съёмке цифровым аппаратом, регистрируемая область составляла 8×12 мм, а при сканировании – 9×12 см. Съёмка цифровым аппаратом может проводиться как в естественном свете, так и при использовании различных световых фильтров, что в некоторых случаях целесообразно для более четкой регистрации частиц в пиве и определения их физико-химической природы.

Использование цифровой обработки позволило зарегистрировать без применения специальных красителей и идентифицировать в исследуемом пиве практически все частицы, которые приводятся в атласе «Осадки в пиве» [214]. В качестве примера на рис. 3.21 приводится сопоставление частиц, обнаруженных в пиве при оцифровке цифровым фотоаппаратом, с частицами, изображёнными в атласе, и показана возможность с минимальными материальными и временными затратами их экспресс-идентификации и определения физико-химической природы.

Как правило, исследовалось пиво из одной партии, но с различными сроками хранения. При анализе нескольких бутылок были обнаружены частицы, примерно одинаковые по своей физико-химической природе. С увеличением сроков хранения пива наблюдалась незначительное увеличение концентрации и размеров частиц. Регистрировались частицы белковой природы (рис. 3.21,*а*), бесцветные частицы в виде отдельных пленок, частицы полисахаридной природы (рис. 3.21,*а*, рис. 3.22,*а*, *г*), частицы фильтрационного материала (рис. 3.21,*б* и рис. 3.22,*б*), частицы фильтрационного картона (рис. 3.22,*д*), длинные нитевидные волокна различной формы (рис. 3.22,*е*), частицы пивного камня (рис. 3.22,*в*) и др. [198]. По виду и количеству зарегистрированных частиц от одной партии к другой можно было судить о соблюдении производителем чистоты и технологии производства пива.



После цифровой обработки

Из атласа

Рис. 3.21. Сопоставление изображений частиц в пиве «Жигулёвское», полученных цифровым аппаратом, и изображённых в атласе «Осадки в пиве»: а – частица белковой природы; б – частица кизельгура; в – частица полисахаридной природы в виде полупрозрачной скрученной пленки (черно-белый формат)

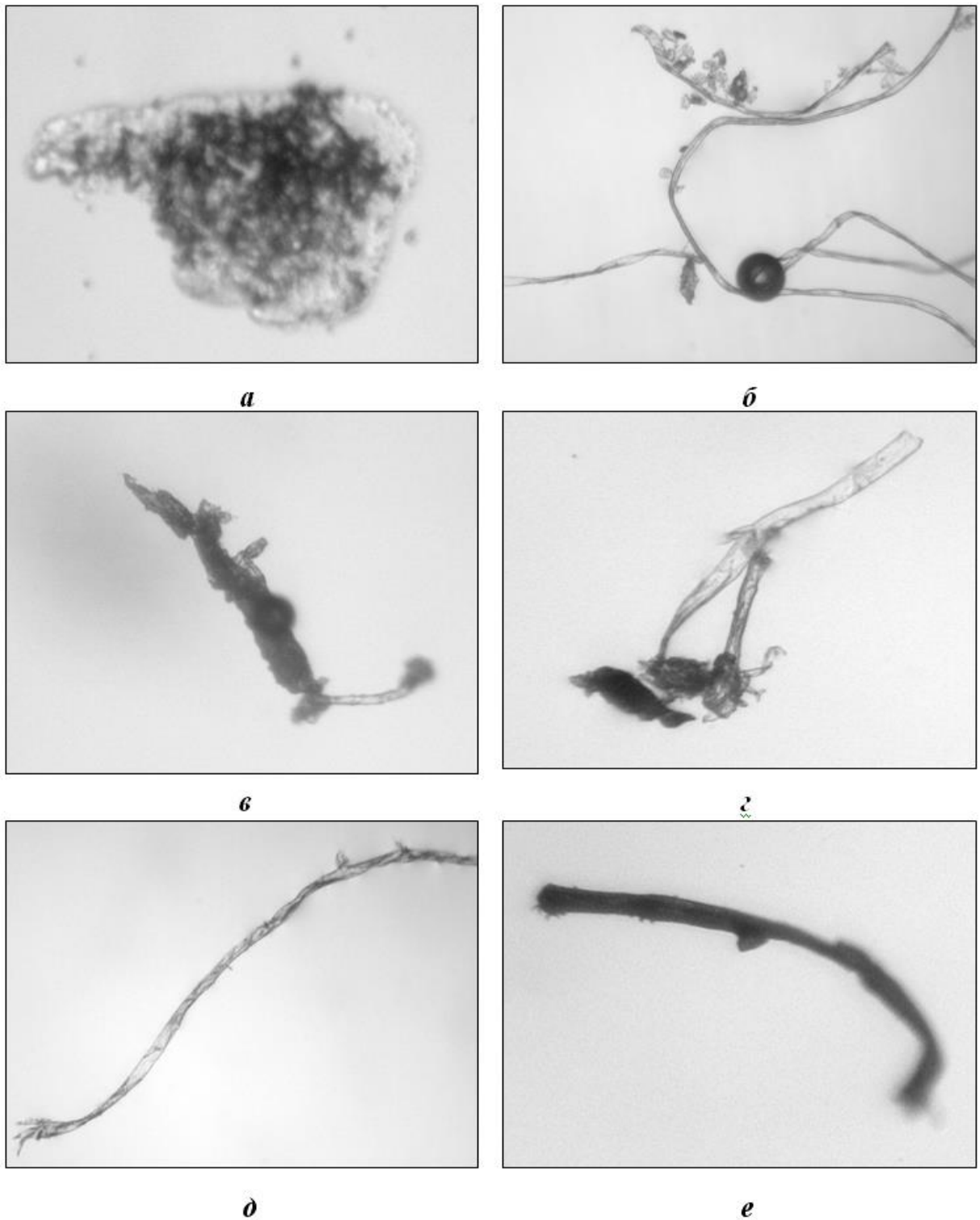


Рис. 3.22. Примеры частиц, обнаруженных в пиве при оцифровке цифровым аппаратом: а – скопление частиц полисахаридной природы; б – фрагменты фильтрационного материала; в – частицы пивного камня; г – плёнки полисахаридной природы; д – волокно фильтрационного картона с характерными «мохнатыми хвостиками»; е – тёмные лёгкие частицы (волокна)

На сегодняшний день одной из главных проблем производителей пива остаётся замедление процесса его старения, заключающегося в нежелательном изменении всех свойств пива, значимых для потребителя, т.е. изменении цвета, прозрачности, пенообразования, вкуса и запаха. Причиной старения пива считается ферментативное или неферментативное окисление. Даже при наличии в пиве различных консервантов и почти абсолютном отсутствии контакта с кислородом скорость образования нежелательных изменений может быть значительной [211, 214]. Регистрация процесса старения пива проводилась по изменению цветовых характеристик пива, т.е. по изменению РК, ЯХ и ПИ.

На рис. 3.23–3.25 представлены результаты оценки изменения цвета пива в процессе его хранения по разностному контрасту. Так как пиво взято из одной партии и розлив происходил в одно и то же время, то изменения, происшедшие в пиве с течением времени, можно надёжно зарегистрировать от бутылки к бутылке. Эти изменения заметны при анализе ЯХ (по положению и интенсивности) и ПИ, представленных на рис. 3.24. На рис. 3.25 показано сравнение ЯХ и ПИ для свежего пива и после 5 недель хранения (бутылка 1). На ПИ в виде резкого изменения (уменьшения) интенсивности четко регистрируются частицы в пиве.

Если бутылка пива была открыта, то под действием кислорода процесс его старения идёт значительно интенсивнее, происходит резкое изменение цветовых характеристик пива и бурное разрастание «плесневидных» образований. В производстве для замедления процесса старения используют различные консерванты [216]. Для стабилизации стойкости пива к процессу старения была опробована перекись водорода (H_2O_2). При использовании H_2O_2 наблюдалась тенденция к увеличению микробиологической и коллоидной стойкости пива.

На рис.3.26,а приведены фотографии пива без перекиси водорода, а на рис. 3.26,б – с перекисью водорода. Налицо значительное повышение коллоидной и биологической стойкости пива при незначительной добавке

перекиси водорода.

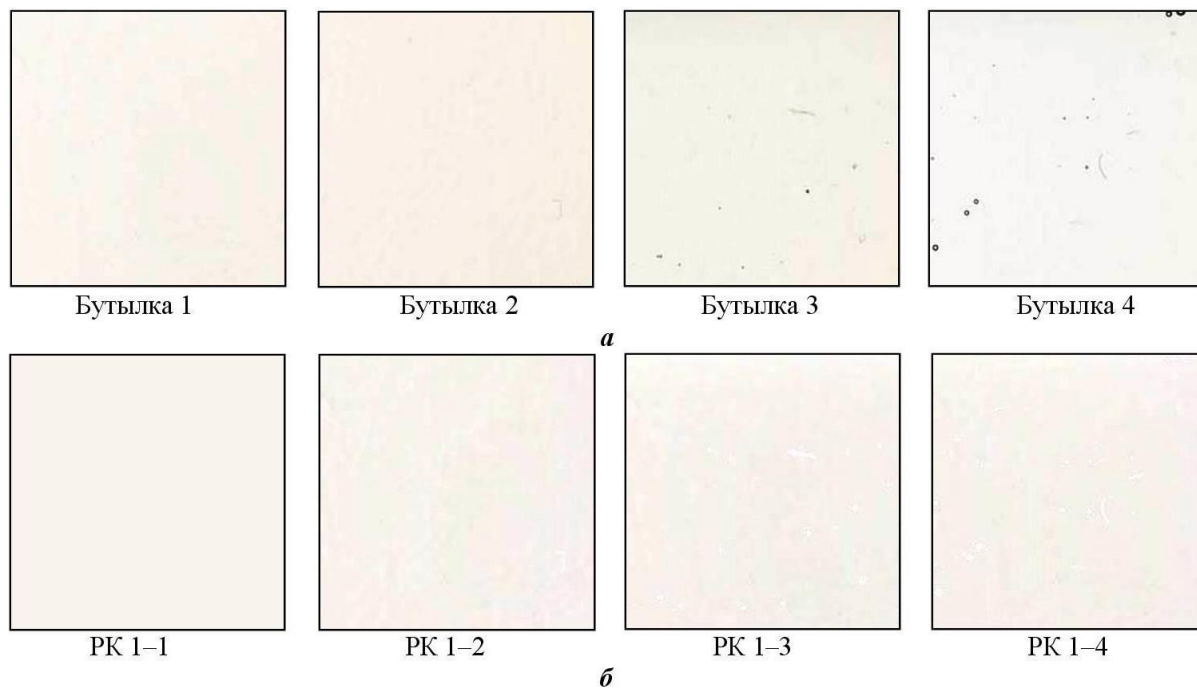


Рис. 3.23. Изменение РК при хранении пива «Жигулёвское» в закрытых бутылках, соответственно, 1 бутылка – диагностика сразу после розлива, 2 – через неделю, 3 – через две недели, 4 – через три недели: а – изображения, полученные при сканировании; б – изображения РК

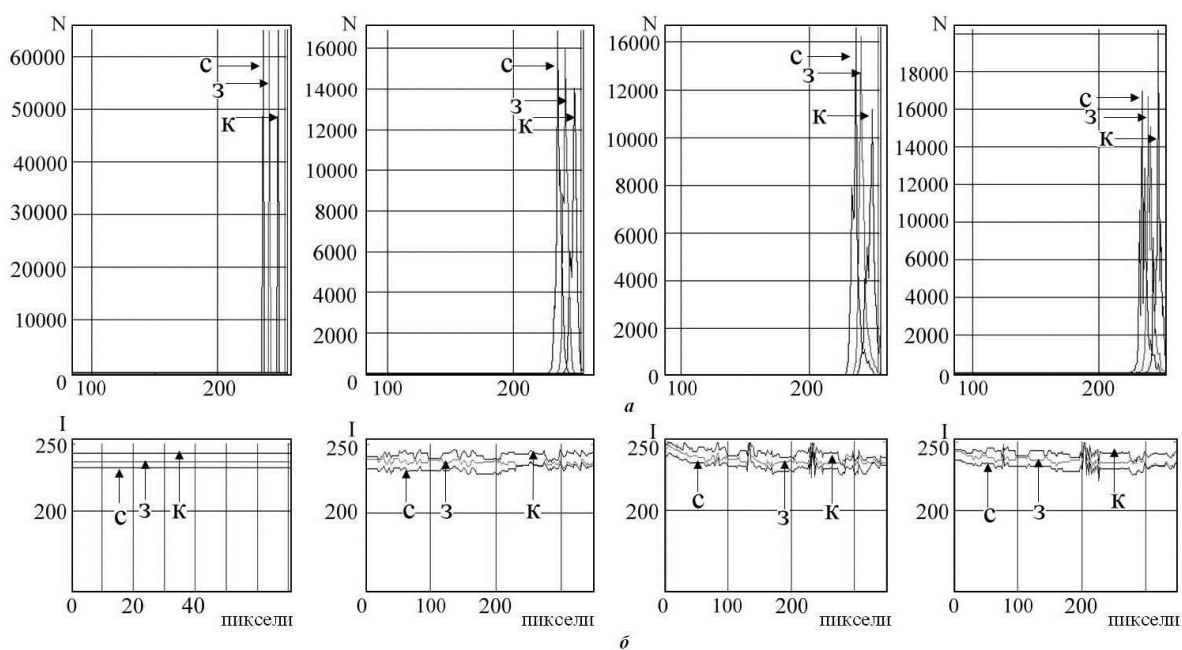


Рис. 3.24. Количественная регистрация изменений ЯХ (а) и ПИ (б), представленных на рис. 3.23,б

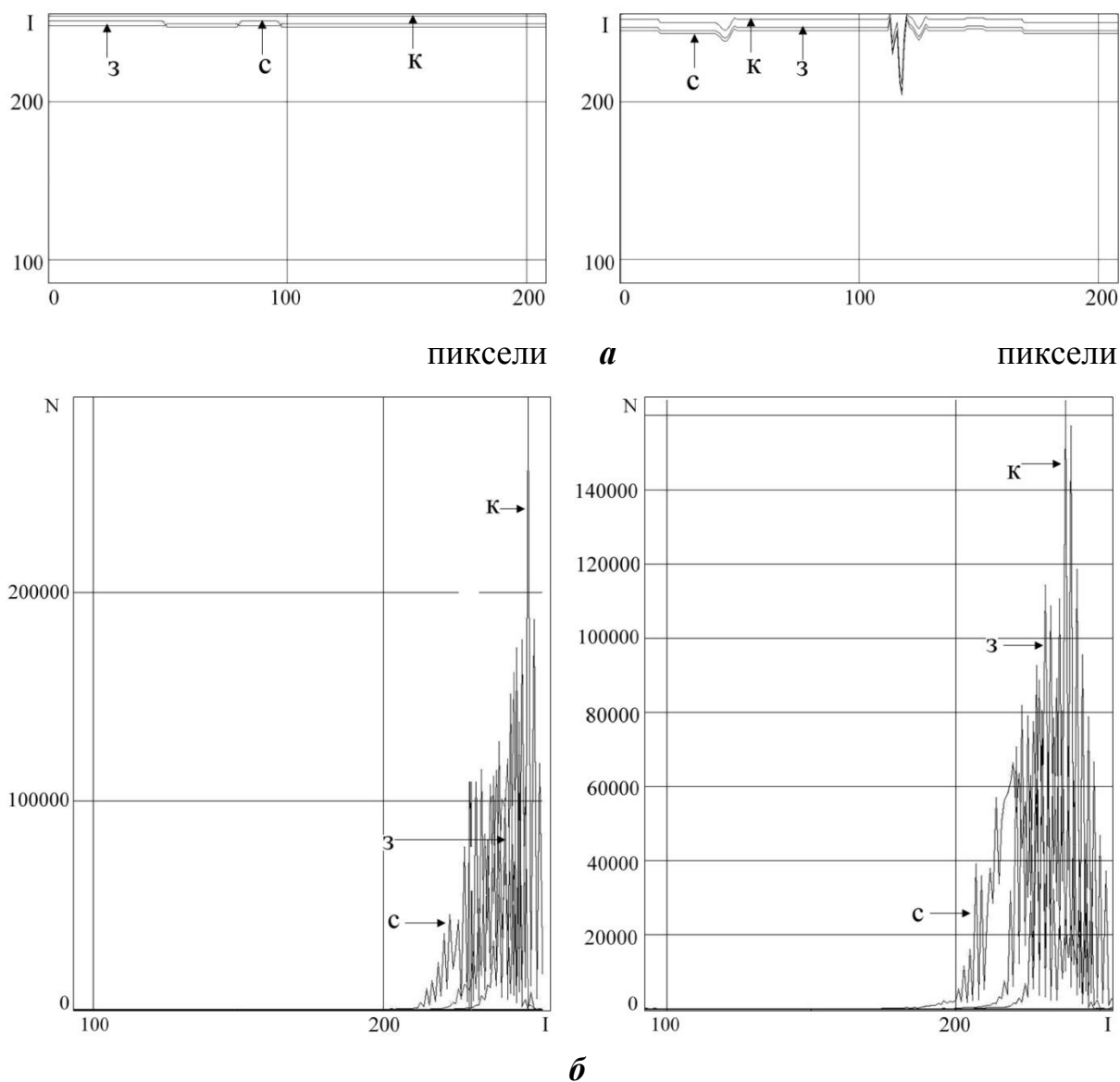
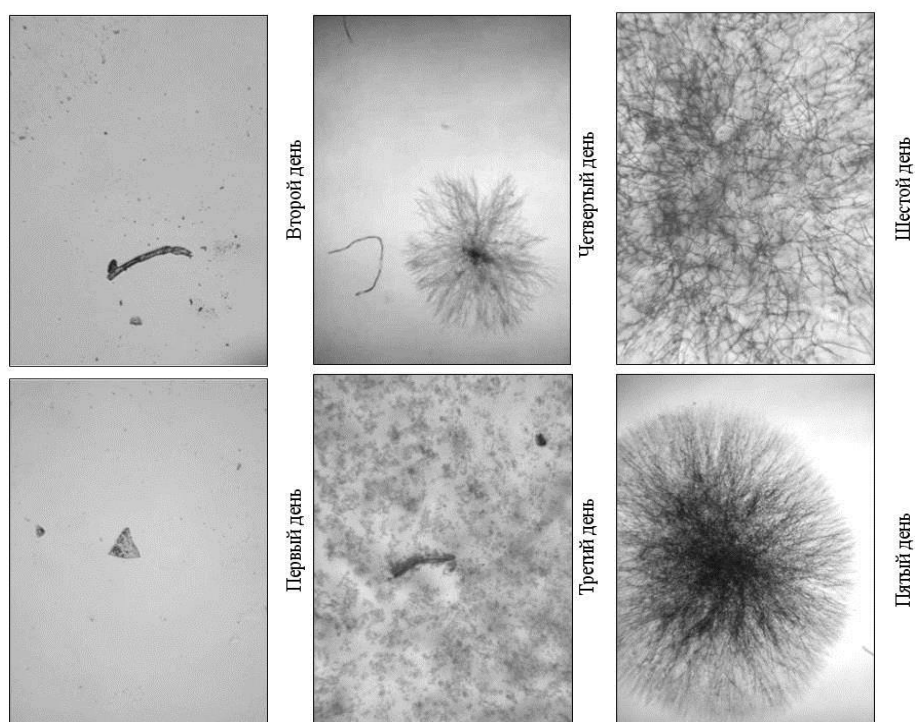


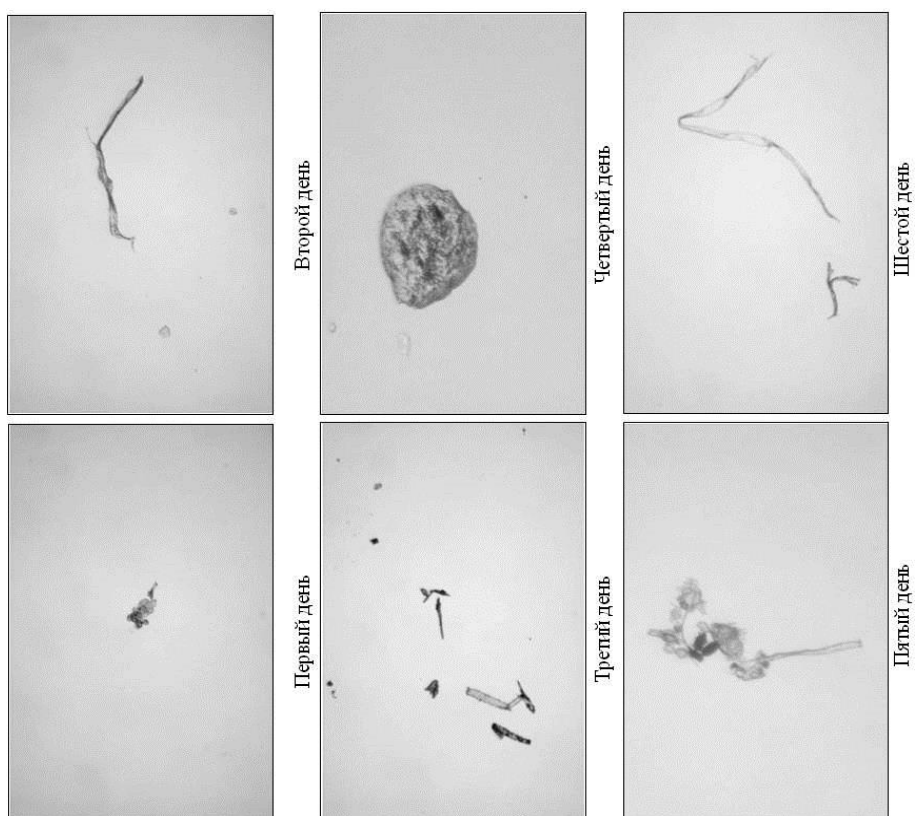
Рис. 3.25. ПИ (а) и ЯХ (б) пива, взятого из бутылки 1: свежее – слева, после хранения в течение 5 недель – справа

Выдержка пива с перекисью водорода в течение нескольких дней не приводила к разрастанию частиц осадка. Форма и размеры частиц примерно оставались прежними. Пиво без перекиси водорода претерпевало за это время значительные изменения. Вокруг частиц осадка происходило сильное разрастание «плесневидных» образований, ухудшалась прозрачность пива и его органолептические показатели.

Аналогичная картина наблюдалась и в пиве других производителей и видов. Скорости этих изменений были различными.



а



б

Рис. 3.26. Изображения осадков, полученных при фотографировании открытых образцов пива при хранении без добавления перекиси водорода (а) и с добавлением перекиси водорода (б)

Таким образом, применение компьютерных технологий является эффективным средством экспресс-диагностики пива и может быть использовано его производителями, а также контролирующими организациями.

3.6. Компьютерная диагностика качества питьевой и промышленной воды

В качестве объектов исследований была выбрана вода:

- рек, каналов и заливов озера Ильмень (Новгородская область);
- вода, поступающая из реки Волхов на левобережные водоочистные сооружения (ЛВС) Великого Новгорода;
- вода, прошедшая многоступенчатую очистку на левобережной водоочистительной станции (ЛВС) и подаваемая в городскую сеть водоснабжения, отвечающая требованиям СанПиН для питьевой воды;
- дистиллированная вода.

Для демонстрации возможностей рассмотренных выше методик экспресс-диагностики качества ниже приводится часть экспериментальных результатов, полученных для проб воды, взятой в осенний и весенний периоды. Забор воды производился в стеклянную и предварительно подготовленную чистую тару, которая плотно закрывалась металлической крышкой, и далее перевозилась для исследования в совместную с ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН научно-учебную лабораторию «Компьютерные технологии в дифракционной диагностике материалов» Новгородского филиала Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики. Опыты с водой проводились непосредственно в день ее отбора. Время между взятием проб и воды и её диагностикой составляло не более 1–1,5 часов.

Оцифровка изображений проводилась цифровым аппаратом, установленным на микроскоп при помощи оптической насадки со встроенным дополнительным объективом. Съёмка воды проводится при одних и тех же условиях и установках цифрового аппарата: освещении (контролировалось

приборами), разрешении, выдержке, расстоянии до объекта. Питание микроскопа осуществлялось через дополнительные стабилизированные источники.

Под объектив микроскопа помещалась подготовленная пустая кювета и проводилась её съемка без воды. Далее на центральную область стекла кюветы с помощью шприца наносилось строго определенное количество воды (1 мл) и снова проводилась съемка. Экспериментальный РК получаем путём вычитания изображения пустой кюветы из изображения кюветы с водой или изображений двух сравниваемых проб [198, 217, 218].

На рис. 3.27 приводятся РК, ЯХ и ПИ для речной воды, поступающей из реки Волхов на ЛВС и воды прошедшей многоступенчатую очистку, а на рис. 3.28 – нулевой РК и соответствующие им ЯХ и ПИ.

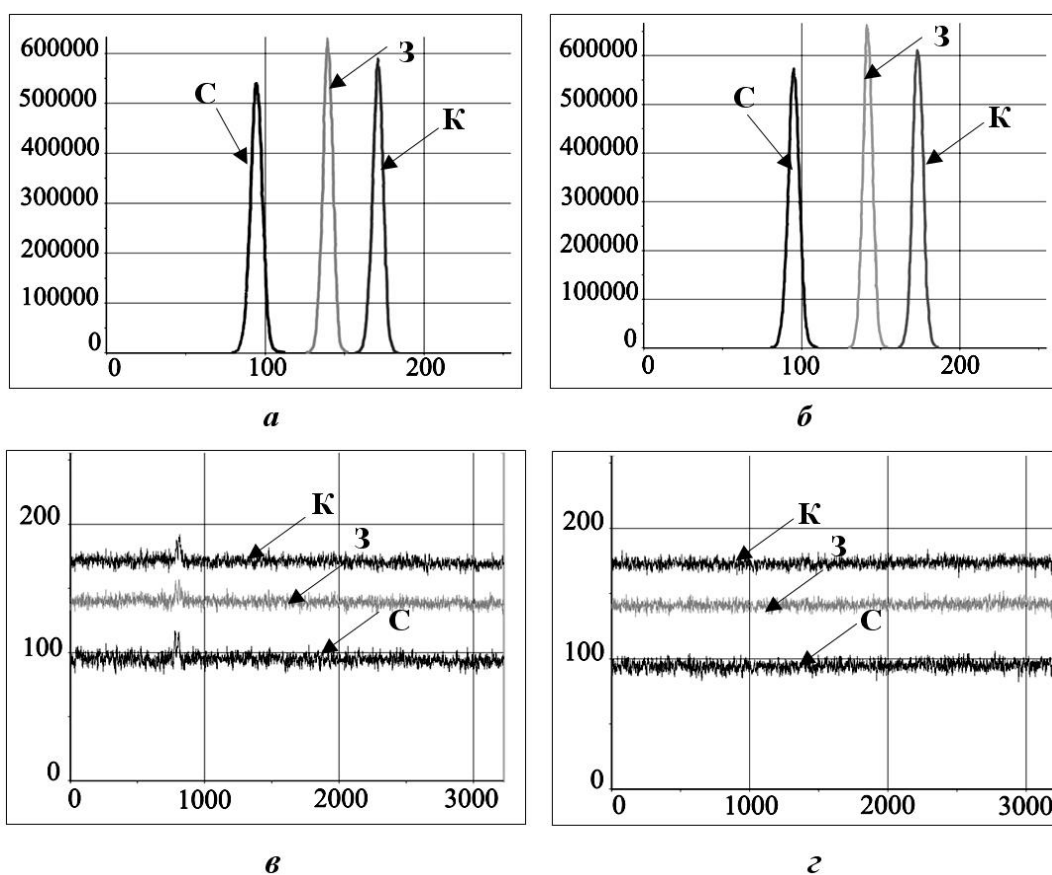


Рис. 3.27. Результат цифровой обработки изображений одной из проб речной воды до (а, в) и после очистки (б, г): а, б – яркостные характеристики, в, г – профили интенсивности; С, З и К – синий, зелёный и красный цветовые каналы

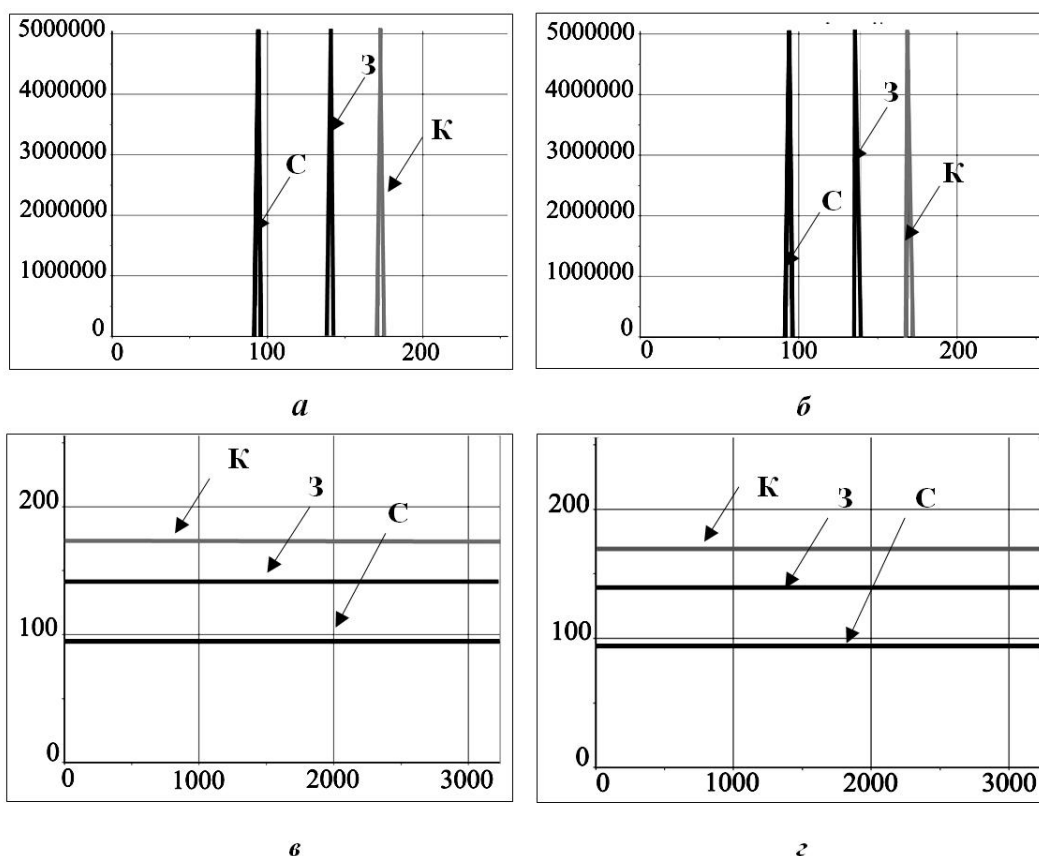


Рис. 3.28. Результат цифровой обработки для нулевых РК проб речной воды (рис. 3.27) до (а, в) и после очистки (б, г): а, б – яркостные характеристики, в, г – профили интенсивности

Анализ экспериментальных изображений проб воды проводился по построенным РК, ЯХ и ПИ, снятым по выбранным направлениям. Изображения проб воды раскладывались на три цветовых канала – синий, зелёный и красный. Компьютерная диагностика показала, что изменения цветовых характеристик различных проб воды для разных цветовых каналов могут сильно отличаться.

Изображения исходных проб воды по цвету визуально друг от друга практически ничем не отличались, но, вычитая изображения очищенной воды из изображения речной воды, получаем ненулевой РК и отличные от нулевого РК яркостные характеристики и профили, т.е. цифровая обработка позволяет надёжно зарегистрировать отличия между очищенной и речной (неочищенной) водой. Результат обработки представлен на рис. 3.29.

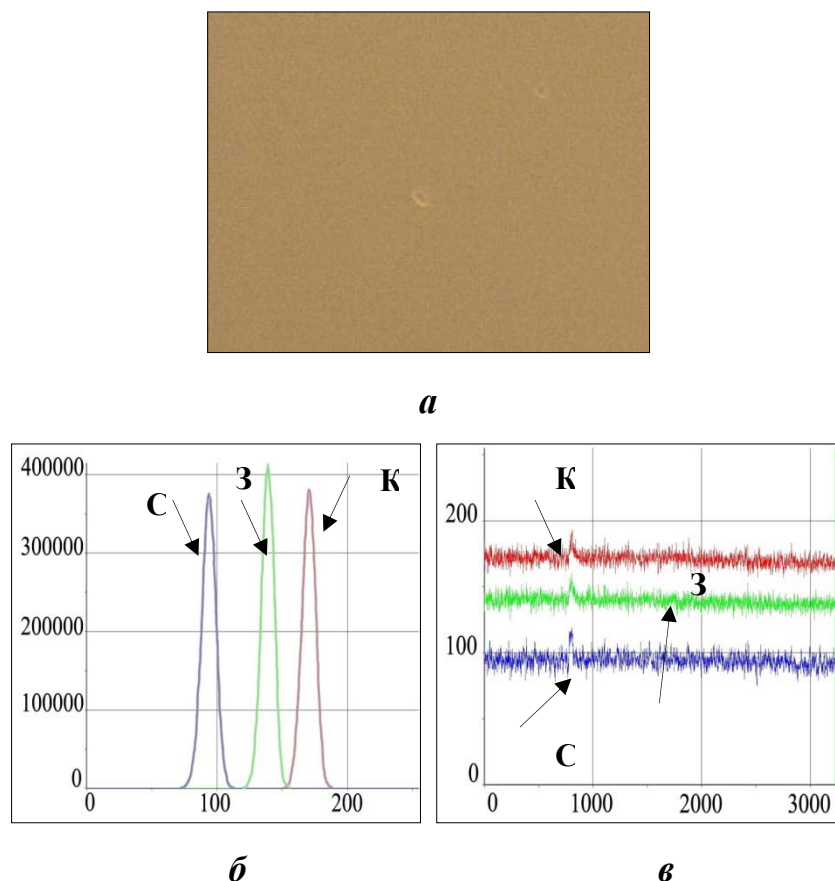


Рис. 3.29. Разностный контраст, полученный вычитанием изображений воды после очистки и речной: а – изображение РК, б – яркостные характеристики, в – профили интенсивности, С, З и К – синий, зелёный и красный цветовые каналы

Максимальные значения ЯХ для речной воды, взятой в разные дни и время года, имеют заметный разброс для всех трёх цветовых каналов. Это хорошо подтверждается данными физико-химического анализа отобранных в течение месяца проб речной воды по гостированным методикам (таблица 3.2).

Для установления связи между физико-химическими параметрами воды и её цветовыми характеристиками в качестве примера приведём следующие показатели: цветность, мутность, рН и щёлочность, которые за всё время проведения эксперимента очень сильно изменялись. Цветность и мутность оказывают наиболее сильное влияние на изменение цветовых характеристик воды, особенно на ЯХ.

Выбранные параметры сильно изменялись и для проб, взятых в разных местах реки Волхов, что связано со многими причинами: судоходством, сливом предприятиями в реку технической воды, наличием пляжей и других зон отдыха, речками и ручьями, втекающими в данный водоем.

Для оценки экспериментальной погрешности определения характеристик изображений один и тот же образец оцифровывался несколько раз: для каждого изображения строились ЯХ и определялись значения X и Y , где X – интенсивность в градациях серого цвета (0–255), соответствующая максимальному значению Y , а Y – число точек, имеющих данное значение интенсивности в градациях серого цвета. Погрешность, определённая по стандартной методике, не превышала 1–2 %, и была обусловлена в основном изменением освещённости анализируемого вещества при оцифровке.

Таблица 3.2

Физико-химические показатели проб воды

Дата	Мутность, мг/л		Цветность, град		pH		Щёлочность	
Норма по СанПиН	1,5		20		6,0-9,0		1,10	
Проба воды	речная	очищенная	речная	очищенная	речная	очищенная	речная	очищенная
17.10.2011	6	0,45	77	11	7,54	6,35	1,4	0,46
25.10.2011	23,8	0,24	70	10	7,36	6,25	1,45	0,48
02.11.2011	6,1	0,7	105	10	7,5	6,45	1,4	0,65
13.11.2011	7,2	0,95	117	7	7,15	6,15	1,15	0,31

На рис. 3.30 нанесены точки, соответствующие максимальным. На этом рисунке можно определить, для каждой цветовой компоненты область, которая будет соответствовать требованиям СанПин к воде, тогда максимальное значение ЯХ проб воды, попавшие в эту область, соответствуют требованиям СанПин, а не попадающие – соответствуют воде, не удовлетворяющей по каким-либо параметрам и характеристикам этим требованиям [219]. Такая вода требует дополнительной очистки и контроля.

В случае необходимости для речной (технической) воды и воды, ис-

пользуемой в различных производствах (промышленная), можно выделить аналогичные области изменений максимумов ЯХ и тем самым установить более или менее жесткий контроль воды по цветовым характеристикам.

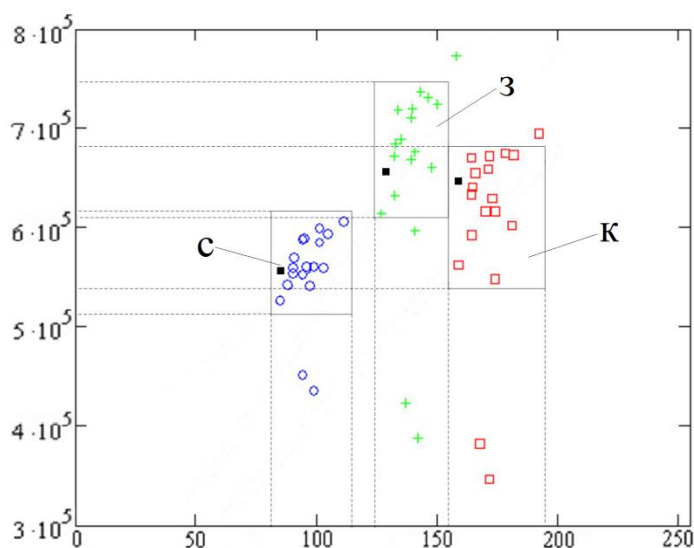


Рис. 3.30. Допустимые области нахождения максимальных значений ЯХ для очищенной воды, соответствующей нормам СанПиН: С, З и К – синий, зелёный и красный цветовые каналы. Чёрными точками показаны результаты диагностики воды, взятой на одном из пищевых предприятий

По полученным экспериментальным данным был проведен расчёт коэффициента корреляции между некоторыми физико-химическими параметрами и цветовыми характеристиками воды.

Коэффициент корреляции вычислялся по формулам (3.1)–(3.3):

$$r = \frac{\sum x \cdot y - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sqrt{C_x \cdot C_y}}, \quad (3.1)$$

где C_x , C_y – дисперсии каждого признака, x – один признак, y – второй признак.

$$C_x = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}; \quad (3.2)$$

$$C_y = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}. \quad (3.3)$$

Считается, что, если $0 \leq r < 1/3$, то связь слабая, если $1/3 \leq r < 2/3$ – связь

средняя, если $\frac{2}{3} \leq r \leq 1$ – связь сильная. Для независимых случайных величин коэффициент корреляции равен нулю, и случайные величины являются некоррелированными.

В таблице 3.3 представлены результаты расчёта коэффициентов корреляции между физико-химическими показателями воды (цветность, мутность, pH и щёлочность) и максимальными значениями ЯХ для трёх цветовых каналов (синего, зелёного и красного).

Таблица 3.3

Коэффициенты корреляции между физико-химическими показателями воды и яркостными характеристиками оцифрованных изображений

Показатель	Коэффициент корреляции					
	Синий канал		Зелёный канал		Красный канал	
	X	Y	X	Y	X	Y
Цветность	–0,496	–0,234	0,583	0,989	0,882	–0,509
Мутность	–0,378	0,989	–0,505	0,012	–0,455	0,967
pH	–0,755	–0,179	–0,222	0,961	–0,452	0,080
Щёлочность	–0,790	–0,317	0,105	0,969	0,908	0,141

Анализ полученных результатов показывает, что цветность воды наиболее сильно коррелирует со значениями ЯХ для зелёного цветового канала по Y и красного канала по X, причём зависимость является прямой, т. е. с увеличением цветности воды возрастают и указанные максимальные значения ЯХ для зелёного и красного каналов. Мутность воды имеет наибольшую и прямую корреляцию со значениями ЯХ для синего и красного каналов по Y. Показатель pH воды наиболее сильно коррелирует со значениями ЯХ для зелёного канала по Y, а щёлочность – со значениями для зелёного канала по Y и красного по X.

Видно, что физико-химические показатели качества воды имеют хорошую корреляцию с максимальными значениями ЯХ для каждого из трёх цветовых каналов, и выбор ЯХ, как критерия оценки качества воды, является обоснованным и объективным.

Помимо анализа проб воды из реки Волхов, был проведен анализ проб воды рек, каналов и заливов озера Ильмень. Исследовалась вода взятая из 15-ти мест озера Ильмень: Юрьев, Сиверсов канал, заливы: Аркадский, Рубельский и Синетский, реки: Баклань, Большая Глинка, Веронда, Веряжа, Замленка, Ловать, Мста, Перерва, Псижа и Шелонь (рис. 3.31).



Рис. 3.31. Карта заборов проб воды водоемов озера Ильмень

В каждом водоеме бралось по 5 проб воды. На рис. 3.32 представлены средние максимальных значений ЯХ РК изображений проб воды по

всем исследованным водоемам, полученные в результате цифровой обработки.

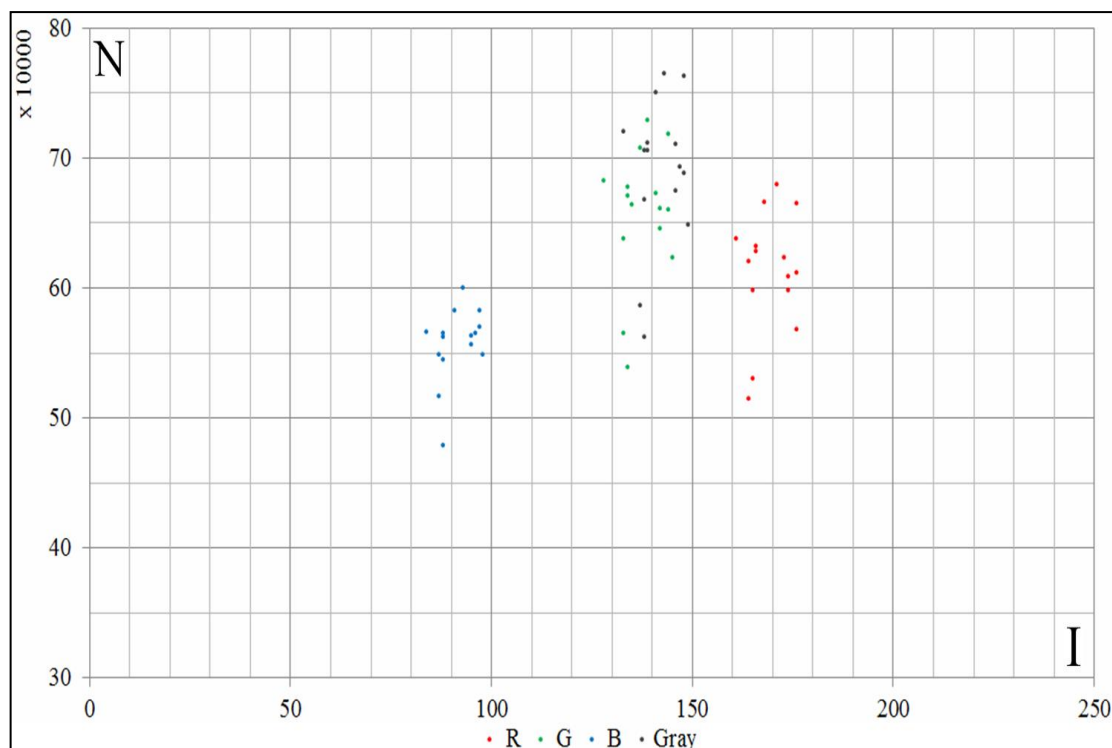


Рис. 3.32. Средние максимальных значений ЯХ разностного контраста изображений проб воды рек и водоемов озера Ильмень по трем цветовым каналам (красный, зелёный, синий) и в градациях серого цвета

На рис. 3.33 приведена диаграмма средних максимальных значений интенсивностей ЯХ разностных контрастов изображений проб воды по каждому водоему

На рис. 3.34 приведена диаграмма средних значений количества пикселей соответствующих максимальным значениям интенсивностей ЯХ разностных контрастов изображений проб воды по каждому водоему.

Полученные результаты свидетельствуют, что вода в разных водоемах озера Ильмень имеет различные пики ЯХ разностного контраста изображений проб. Кроме того, с учетом ранее сделанного корреляционного анализа можно предположить, что вода реки Ловать на момент исследования обладала наименьшей цветностью, щёлочностью, мутностью и имела

более низкий уровень pH, чем другие исследуемые водоемы. В тоже время, вода реки Псижа, напротив, на момент исследования имела наибольшие значения контролируемых показателей.

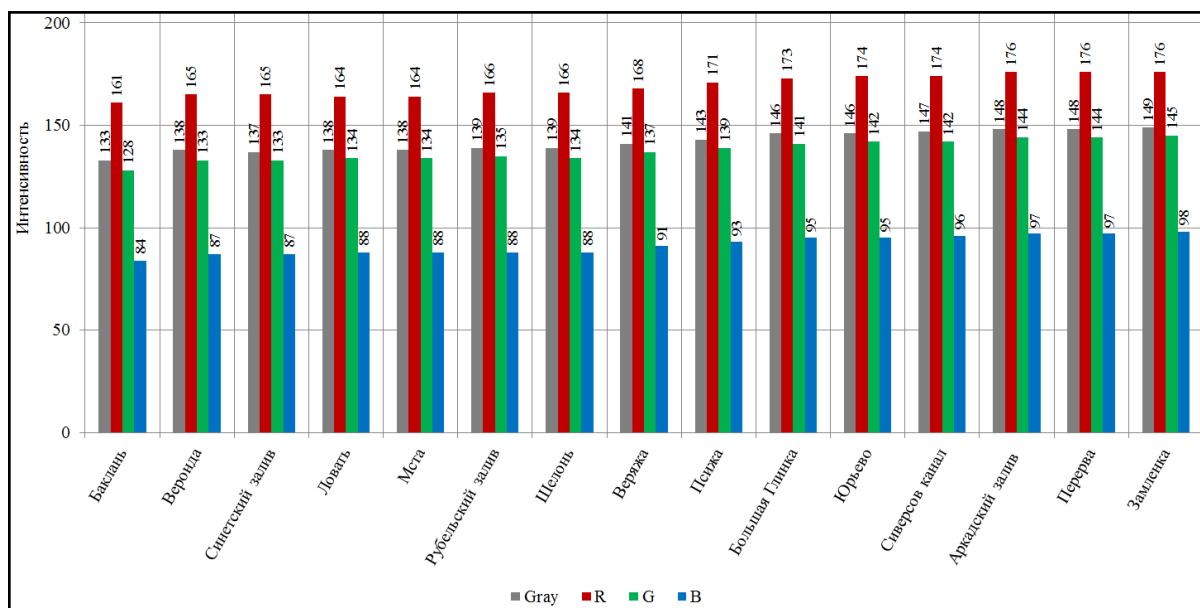


Рис. 3.33. Средние максимальные значения интенсивностей ЯХ разностного контраста изображений проб воды водоемов озера Ильмень по трем цветовым каналам и в градациях серого цвета

Пробы воды Сиверсова канала, Рубельского залива и реки Перервы имеют примерно одинаковую цветность, щелочность и равный уровень pH, но различаются по мутности.

Пробам воды рек Ловать, Мста, Шелонь и Рубельского залива в среднем присуща одинаковая мутность, близкие значения цветности и щелочности.

С использованием вышеприведённой методики был проведен сравнительный анализ воды реки Волхов, водопроводной воды и дистиллированной воды. На рис. 3.35 представлены полученные в результате обработки пиковые значения ЯХ разностного контраста изображений проб воды для трех цветовых каналов и в градациях серого цвета.

Оценивая полученные результаты можно констатировать, что максимальные значения ЯХ разностного контраста изображений проб дистил-

лированной воды имеют меньший разброс по красной и зеленой компонентам.

С учетом корреляционного анализа можно утверждать, что пробы дистиллированной воды более однородны по физико-химическим показателям и по сравнению с речной и водопроводной водой, обладают большей цветностью, щелочностью и более высоким уровнем pH. Максимальные значения ЯХ разностного контраста изображений проб водопроводной воды имеют больший разброс по красному и зеленому цветовым каналам, следовательно, пробы водопроводной воды весьма неоднородны по своим физико-химическим показателям.

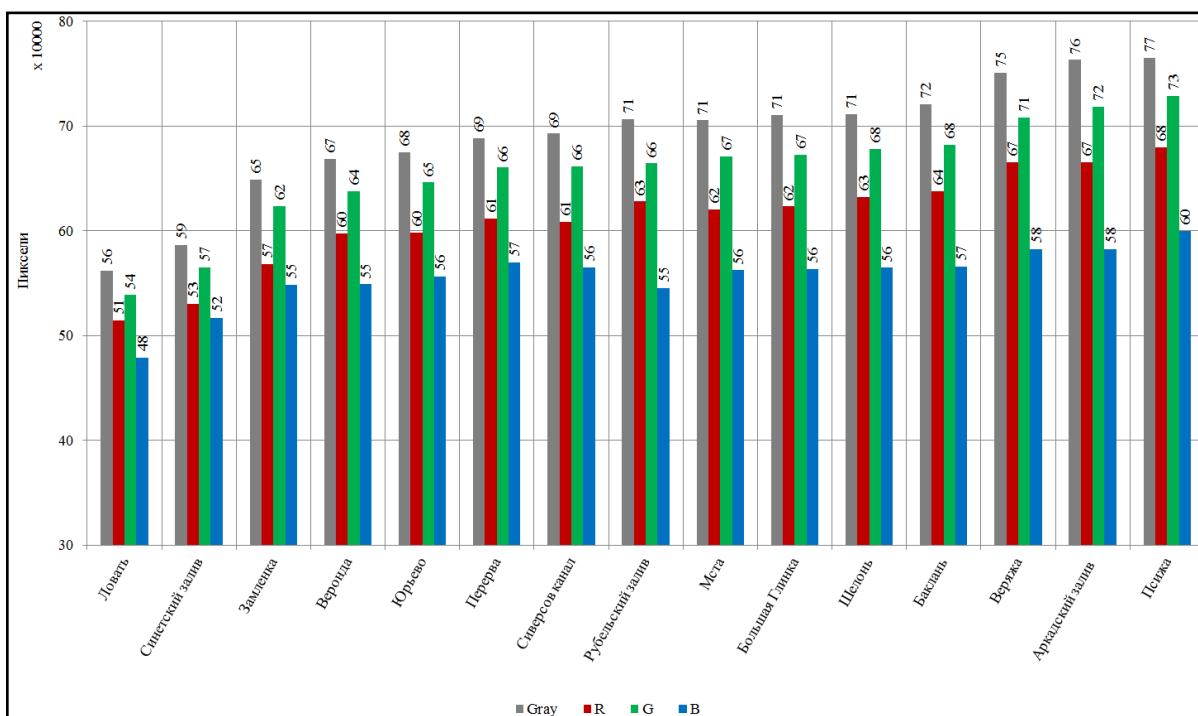


Рис. 3.34. Средние значений количества пикселей соответствующих максимальным значениям интенсивностей ЯХ разностного контраста изображений проб воды водоемов озера Ильмень по трем цветовым каналам и в градациях серого цвета

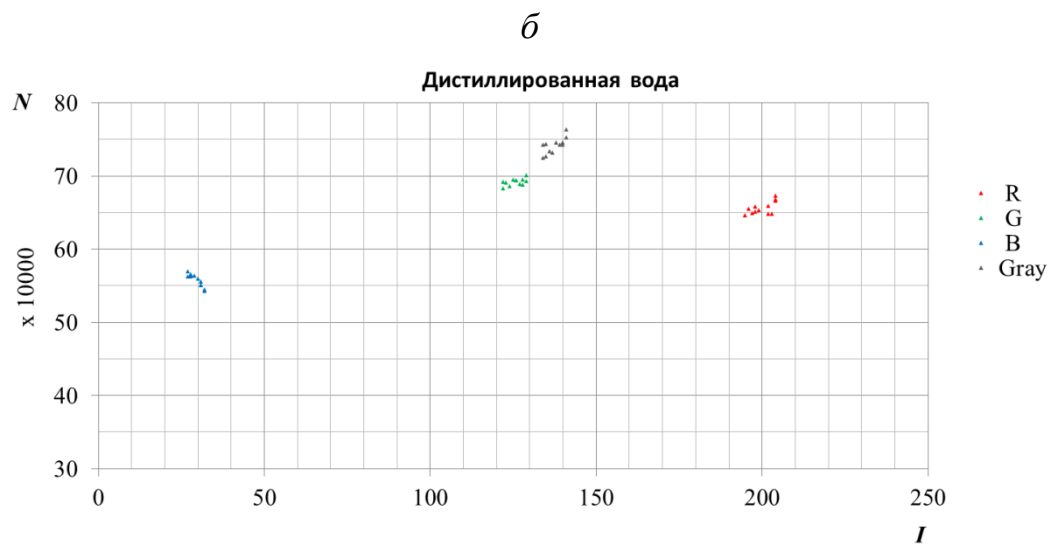
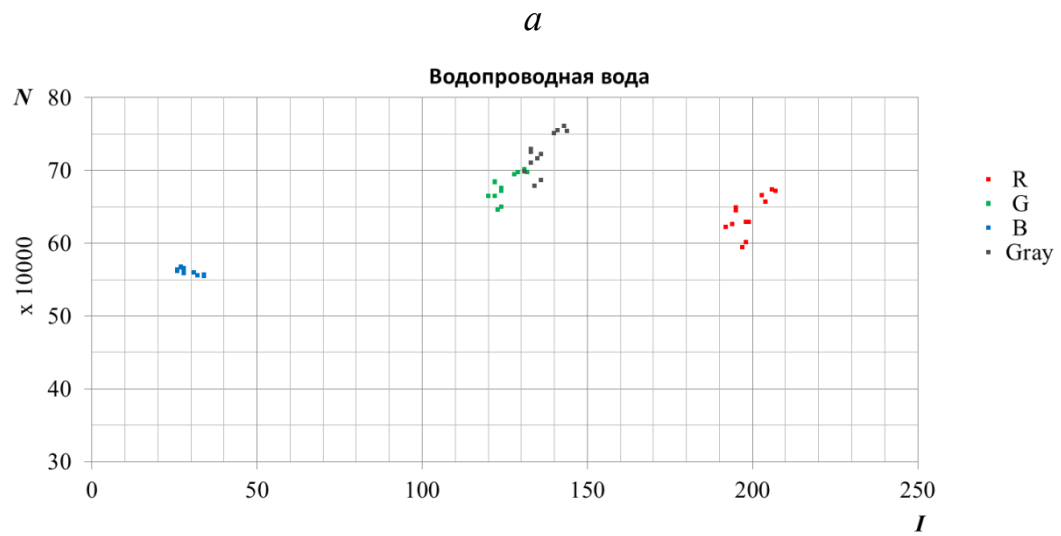
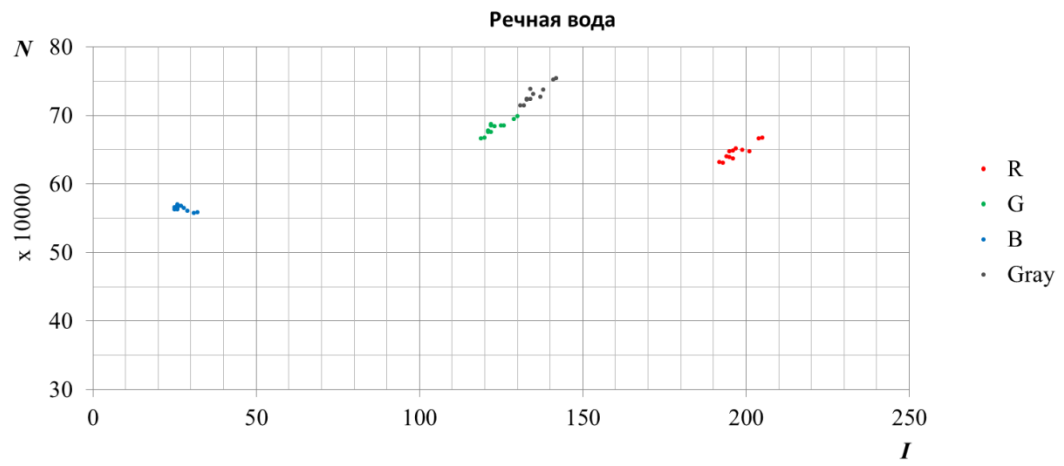


Рис. 3.35. Максимальные значения ЯХ РК изображений проб речной (а), водопроводной (б) и дистиллированной (в) воды по трем цветовым каналам (красный, зелёный, синий) и в градациях серого цвета

Пробы речной воды имеют большую цветность, щелочность и уровень рН, чем пробы водопроводной воды, но меньше чем пробы дистиллированной воды.

Таким образом, данная цифровая методика обработки изображений исследуемых веществ является простой и чувствительной к малейшим изменениям химического состава воды, обладает высокой эффективностью и экспрессностью.

3.7. Компьютерная диагностика винной продукции

К пищевым продуктам, которые наиболее часто фальсифицируются, можно отнести алкогольные напитки. На сегодняшний день для ряда регионов России характерно появление на рынке фальсифицированной винодельческой продукции, которая отрицательно сказывается на их экономике и развитии. Разнообразие сортов виноградного вина и приемов его производства обуславливает многочисленные возможности для фальсификации этого продукта. Поэтому развитие и усиление контроля качества и безопасности алкогольной продукции является одним из приоритетных направлений современной науки о питании. Для проведения идентификации и обнаружения фальсификации вина на практике используют методы, которые зачастую являются трудоёмкими, требуют для своего проведения значительных затрат времени и материалов, применения дорогостоящего оборудования и квалифицированных специалистов.

К важнейшим показателям качества вин, помимо, вкуса, относятся их цвет. Цвет и интенсивность окраски красных вин зависят от его возраста, технологии, климата, почвы и сорта винограда. В связи с этим представляет интерес применить для диагностики вина методы цифровой обработки изображений, рассмотренные выше и основанные на регистрации изменений цветовых характеристик [198]. Окраска, в частности, красных вин и ее стабильность определяются веществами полифенольной природы, извлеченными из кожицы и семян винограда. Основная роль в придании и

сохранении окраски вин принадлежит антоцианам и танинам (полимерным фенольным соединениям) [220].

Интенсивность окраски вин в процессе хранения, выдержки и обработки значительно снижается. Снижение окраски интенсифицируется температурой, кислородом, альдегидами, ионами переменной валентности, высоким рН вина, отсутствием ингибиторов [221].

Компьютерная диагностика винной продукции осуществлялась путем исследования цветовых характеристик при помощи планшетного сканера, позволяющего зарегистрировать небольшие изменения цвета. К цветовым характеристикам вина относится яркость и цветность. Яркость соответствует прозрачности вина и изменяется обратно пропорционально интенсивности окраски. Цветность определяет чистота продукта и доминирующая длина волны, характеризующая его оттенок. Таким образом, цвет вина определяется его яркостью, цветностью и чистотой [221]. Анализируемой компонентой является суммарная интенсивность:

$$I_{\text{сум}} = \sum I_p(i). \quad (3.4)$$

При диагностике винной продукции были рассмотрены несколько видов фальсификации.

1. Разбавление или галлизация – способ, при котором кислые, плохие вина «улучшают» добавлением воды с последующим доведением крепости и кислотности до требуемых норм.

2. Добавление избытка сульфита для увеличения срока сохранности продукции.

3. Использование некачественного вина, подвергшегося избыточному нагреву в процессе хранения и транспортировки.

В качестве примера эффективности цифровых методик ниже представлены экспериментальные результаты исследования двух видов красного вина, произведенных из разных сортов винограда:

– Каберне виноградное натуральное красное полусладкое с содержанием сахара 30–50 г/дм³ и алк. 9–11% об. (производство Молдавии);

– Изабелла красное полусладкое «Русская лоза» с содержанием сахара 30–40г/дм., алк. 10–12% об. (производство России, Краснодарский край).

Эксперименты проводились следующим образом. Вино в количестве 50–100 мл наливало в стеклянную кювету, установленную на планшетный сканер. Рядом с кюветами помещался стандарт оптической плотности, который является абсолютным стандартом. Стандарт имеет участки с разным, но заранее известным поглощением. Далее проводилось сканирование в ручном режиме при разрешении 600 dpi. Из каждого оцифрованного изображения вырезался квадрат размером 100x100 пикселей (0,4 x 0,4 см) и с помощью программы «Image-Pro Plus» определялось количество пикселей и интенсивность каждой из трех составляющих цветного изображения: красной, синей и зеленой [198].

3.7.1. Влияние галлизации на цветность вина

Разбавление вина производили дистиллированной водой. Исследовался исходный образец и образцы с 5 %, 10 %, 15 % и 30 % разбавлением. Результаты исследований разбавления вина Каберне отражены в табл. 3.4 и диаграммах рис. 3.36. Результаты исследований разбавления вина Изабелла отражены в табл. 3.5 и а диаграммах рис. 3.37.

Таблица 3.4

Изменение суммарной интенсивности вина Каберне при разбавлении

Разбавление, %	Средняя суммарная интенсивность		
	красная компонента	зеленая компонента	синяя компонента
0	$1,18 \times 10^7$	101590	566684
5	$1,21 \times 10^7$	299647	878827
10	$1,25 \times 10^7$	386130,5	923274,5
15	$1,28 \times 10^7$	290265	715991
30	$1,38 \times 10^7$	466661,5	695063,5

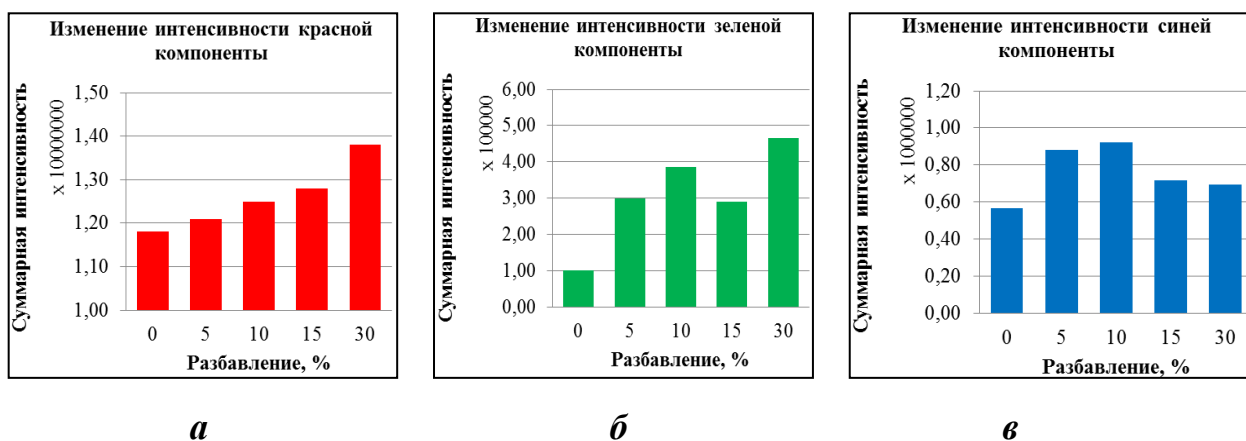


Рис. 3.36. Изменение интенсивности для вина Каберне: а – красная компонента, б – зеленая компонента, в – синяя компонента

Таблица 3.5

Изменение суммарной интенсивности вина Изабелла при разбавлении

Разбавление, %	Средняя интенсивность		
	красная компонента	зеленая компонента	синяя компонента
0	$1,48 \times 10^7$	1092375	1403158
5	$1,57 \times 10^7$	976962,5	1040647
10	$1,62 \times 10^7$	1207005	1311365
15	$1,65 \times 10^7$	1316617	1205729
30	$1,78 \times 10^7$	1963225	1753105

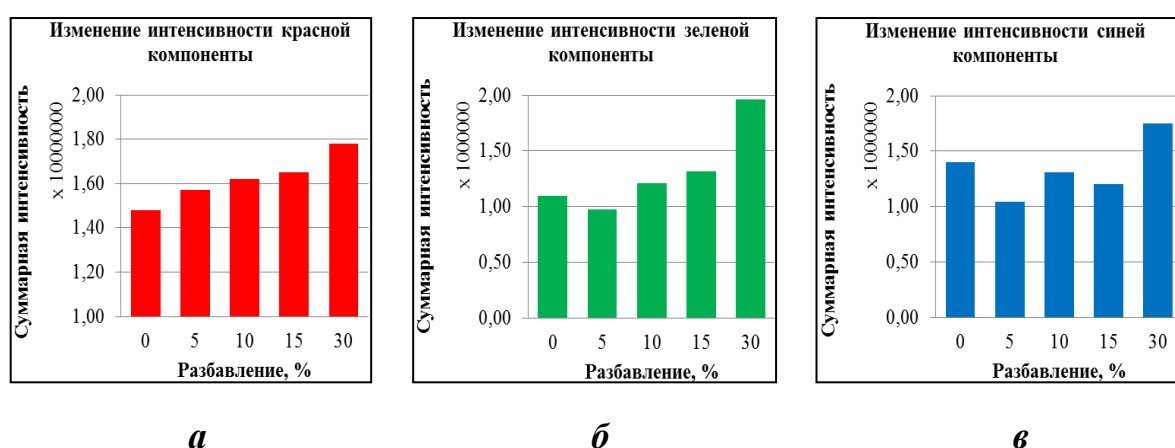


Рис. 3.37. Изменение интенсивности для вина Изабелла: а – красная компонента, б – зеленая компонента, в – синяя компонента

По интенсивности красной компоненты (рис. 3.36,*а*, рис 3.37,*а*) можно оценивать разбавление. С увеличением разбавления интенсивность окраски увеличивается.

Для проверки полученных результатов было произведено разбавление вина с добавлением сахара и спирта. Результаты исследований вина Каберне отражены в табл. 3.6 и диаграммах рис. 3.38.

При сравнении диаграмм рис. 3.36,*а* и рис. 3.38,*а* можно сделать вывод, что варьирование содержания спирта и сахара в пределах 30% не оказывает заметного воздействия на цветность вина.

Таблица 3.6

Изменение суммарной интенсивности вина Каберне при разбавлении с восстановлением крепости и сахаристости

Разбавление, %	Средняя интенсивность		
	красная компонента	зеленая компонента	синяя компонента
0	$1,14 \times 10^7$	1394438	1889470
5	$1,23 \times 10^7$	374146,5	936681,5
10	$1,23 \times 10^7$	403466	945829
15	$1,33 \times 10^7$	373621	818973
30	$1,43 \times 10^7$	506511,5	877643

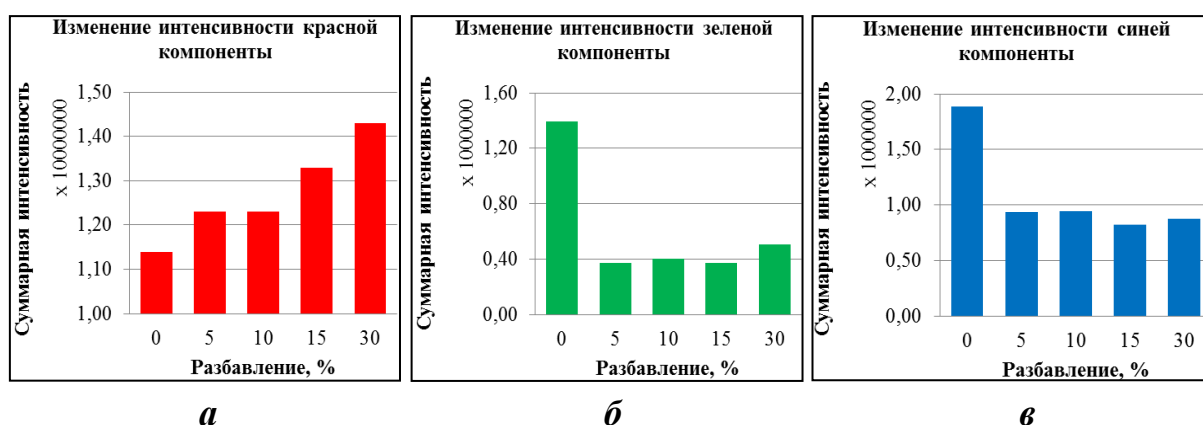


Рис. 3.38. Изменение интенсивности для вина Каберне при разбавлении с восстановлением крепости и сахаристости: *а* – красная компонента, *б* – зеленая компонента, *в* – синяя компонента

3.7.2. Влияние избыточного сульфита на цветность и сохранность окраски вина

Сульфитация снижает интенсивность окислительно-восстановительных процессов в продуктах переработки винограда. Умеренное поступление кислорода ($10\text{--}20 \text{ мг/дм}^3$) является нормальным для здорового винограда и обеспечивает при прочих равных условиях получение чистых здоровых вин. Избыточное ($30\text{--}40 \text{ мг/дм}^3$ и более) поступление кислорода приводит к получению окисленных вин с обедненным сортовым ароматом, простым выветренным ароматом и вкусом [222]. Наибольший вред аромату и цвету будущего вина наносит чрезмерное окисление.

Для проведения эксперимента было взято два образца вина по 100 мл. Второй образец содержал 0,06 г сульфита натрия, что соответствует максимально допустимому содержанию сульфита в вине [223]. Образцы хранились при доступе кислорода. Данные пробы сканировались каждые сутки. Результаты исследования представлены в табл. 3.7 и на рис. 3.39.

Таблица 3.7

Изменение суммарной интенсивности в процессе хранения при сульфитации вина Каберне

Период хранения, суток	Суммарная интенсивность					
	красной компоненты		зеленой компоненты		синей компоненты	
	исходный	сульфит	исходный	сульфит	исходный	сульфит
1	$1,14 \times 10^7$	$1,60 \times 10^7$	1394438	1081029	1889470	1025372
2	$1,06 \times 10^7$	$1,39 \times 10^7$	320139	619908	816286	540034
3	$1,04 \times 10^7$	$1,36 \times 10^7$	300531	637338	934178	760788
4	$1,03 \times 10^7$	$1,33 \times 10^7$	261252,5	606442	843426	826456
8	$9,09 \times 10^6$	$1,15 \times 10^7$	160818	409634	685532	828869
9	$8,30 \times 10^6$	$1,07 \times 10^7$	231948	264861,5	680856,5	733659,5
10	$7,98 \times 10^6$	$1,01 \times 10^7$	334339	295065	729354,5	771033

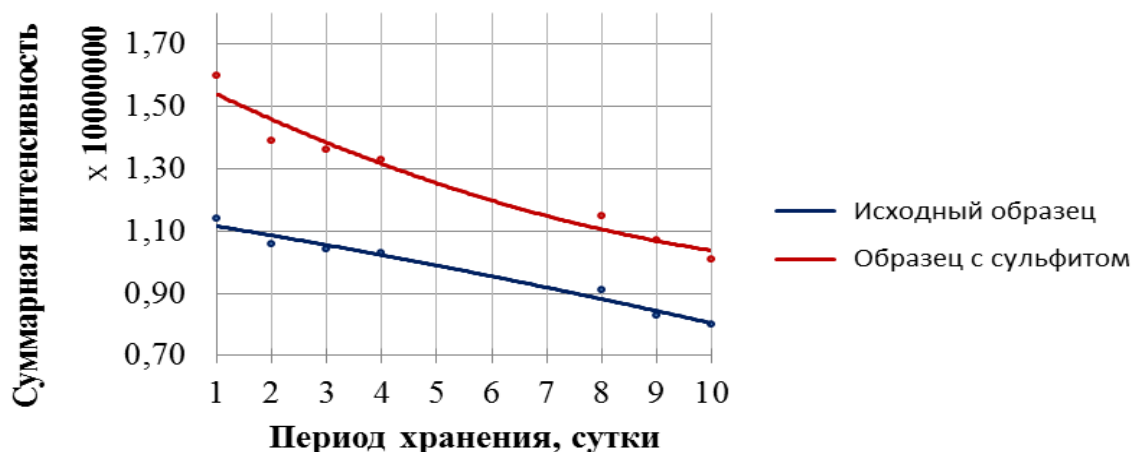


Рис. 3.39. Изменение интенсивности красной компоненты при добавление сульфита в Каберне

Анализируя полученные результаты можно заключить, что добавление сульфита значительно увеличивает яркость в среднем на 30%, но не защищает от исчезновения цвета.

3.8. Выводы

Приведенные выше примеры применения цифровых методик для диагностики качества различных по физико-химическим свойствам веществ и контроля технологических процессов, основанных на анализе яркостных характеристик и регистрации их изменений, показали простоту их практической реализации и экспрессность, объективность и достоверность, высокую чувствительность и разрешение.

Для реализации этих методик не требуется применения дорогостоящего аналитического оборудования, рутинных химических методов, вредных веществ и специалистов высокой квалификации.

Рассмотренные методики перспективны в первую очередь для оперативного экспресс-контроля поступающего на предприятие сырья, технологического процесса, процесса хранения и транспортировки готовой продукции. Методики могут быть успешно применены различными органами, контролирующими качество пищевых продуктов и их производство, хра-

нение и реализацию через торговую сеть, например, торговой инспекцией и Роспотребнадзором.

Цифровые методики позволяют зарегистрировать не только качественные изменения цветовых характеристик исследуемого вещества, но и дать количественную оценку этих изменений, что существенно снижает субъективность визуального контроля, производимого специалистами предприятия.

Аппаратная реализация экспресс-контроля достигается с помощью доступных по цене планшетных сканеров и цифрового фотоаппарата. В качестве программного обеспечения могут использоваться специализированные пакеты «Matlab», «Mathcad», «Image-Pro Plus», «Adobe Photoshop» или аналогичные им.

Основные полученные научные и практические результаты сводятся к следующему.

1. Предложены и апробированы на большом количестве образцов экспресс-методики регистрации цвета и его изменения при различных внешних воздействиях и хранении мясного сырья, колбасных изделий, воды, пива и вина. Качественная и количественная информация об изменениях цвета надёжно фиксируется по РК, ОРК, ПИ и ЯХ.

2. При оцифровке изображений мяса, мясопродуктов и других объектов предпочтительным является «ручной режим» сканирования с неизменными для данного образца установками, что позволяет достичь наиболее полной и объективной регистрации изменений их цвета.

3. Мясное сырьё (говядина, свинина и др.) различных производителей, отличающееся друг от друга по органолептическим характеристикам и показателям свежести, отличается по цвету, что трудно регистрируется визуально, но легко при оцифровке и последующей цифровой обработке изображений мяса.

3. При хранении, заморозке и разморозке мясного сырья наблюдается изменение цвета мяса, не всегда регистрируемое визуально, но чётко

фиксируемое по изменениям ЯХ.

4. Хранение колбасных изделий при разных условиях способствует различной скорости изменения их цветовых характеристик, также трудно регистрируемых визуально.

3. Показана экспресс-методики визуализации процесса посола мяса цыплёнка-бройлера смесью соль-перец-чеснок. Глубина проникновения смеси и её компонентов надёжно определялась по ПИ и ОРК. Увеличение при построении ОРК числа градаций цвета позволяет оценить изменения в мясе при посоле, связанные с изменением концентрации смеси и её отдельных компонентов по глубине.

4. Обработка оцифрованных изображений линейным фильтром (гаусс-размытие) уменьшает влияние на результат цифровой обработки границ между волокнами мышечной, соединительной и жировой тканей.

5. Более полная информация о процессе посола получается при разложении изображения мяса по цветовым каналам – красному, зелёному и синему. Наибольшая информативность характерна для синего и зелёного каналов. Методика, основанная на построении РК, надёжно регистрирует даже незначительные изменения, происходящие при посоле, а также визуализирует изменения контраста за любой промежуток времени. Комбинированная методика, включающая в себя построение РК, разложение его на цветовые компоненты, построение ОРК и ПИ, наиболее наглядна и информативна.

Результаты проведенных исследований не противоречат данным, полученным ранее специалистами при использовании других диагностических методов и опубликованным в специальной литературе.

6. Цифровая обработка, основанная на регистрации изменений цветовых характеристик, может быть использована для диагностики и исследования качества пива, контроля технологического процесса, процесса старения, регистрации и идентификации частиц, условий хранения и транспортировки.

8. Применяя в качестве оцифровывающего устройства профессиональный цифровой фотоаппарат в комплекте с микроскопом, снабженным дополнительно оптической насадкой, и предложенные цифровые методики, можно провести экспресс-оценку качества воды, поступающей на предприятия пищевой промышленности.

9. Цифровые методы могут быть успешно применены для определения фальсифицированной продукции, в частности, винной.

10. Наиболее предпочтительным является представление оцифрованных изображений не в черно-белом, а в цветном формате. При этом достигается большая наглядность и лучшее визуальное восприятие анализируемых изображений.

11. Внедрение данных методик перспективно для экспресс-контроля качества большого класса веществ, у которых под действием различных внешних и внутренних факторов имеет место не видимое визуально, но надежно фиксируемое техническими средствами изменение цветовых характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом данного диссертационного исследования можно считать введение количественных критериев оценки качества изображений объектов различной физико-химической природы, снижающих субъективность и повышающих надежность идентификации дефектов структуры различного типа монокристаллов, экспресс-диагностику мясного сырья, мясопродуктов, процесса посола мяса, промышленной и питьевой воды, пива и вина, а также уменьшение в 10–12 раз времени устранения фоновой неоднородности топографических и поляризационно-оптических изображений цифровой обработкой, основанной на дискретном вейвлет-анализе. К основным результатам следует отнести также повышение информативности и экспрессности методов исследования дефектов структуры монокристаллов, т.е. методов РТБ и фотоупругости.

Результат достигнут, благодаря:

- изучению яркостной и частотно-временной природы экспериментального контраста дефектов структуры монокристаллических полупроводников, зарегистрированного методами РТБ, Ланга и фотоупругости;
- разработке и апробации на большом количестве полупроводников эффективных способов устранения зашумляющих факторов, затрудняющих расшифровку экспериментального контраста и надёжную идентификацию дефектов структуры, с упором на устранение сильной фоновой неоднородности и повышение качества анализируемых изображений;
- сравнению эффективности различных органолептических, физико-химических и оптических методов диагностики качества веществ различной физико-химической природы, а также диагностических методов, основанных на современных компьютерных технологиях;
- оптимальному подбору критериев оценки качества исследуемых объектов и технологических процессов по изменению цветовых характеристик: разностному контрасту, областям равного контраста, яркостным

характеристикам и профилям интенсивности;

- уменьшению субъективного фактора при визуальном анализе оцифрованных изображений;

- проведению исследований на производственной базе предприятий пищевой промышленности и водоочистительной станции, что позволило провести сравнение полученных экспериментальных результатов по разработанным методикам экспресс-диагностики с результатами, полученными по гостированным методам и методикам;

- созданию в Совместной с ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН научно-учебной лаборатории «Компьютерные технологии в дифракционной диагностике материалов» необходимой материально-технической базы;

- апробации основных результатов на конференциях и семинарах различного уровня.

В ходе выполнения диссертационной работы автором были получены следующие основные научные результаты.

1. Проведен анализ результатов вейвлет-обработки топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов, полученных ранее, позволивший создать методику устранения фоновой неоднородности и явления элайзинга (флуктуации интенсивности после цифровой обработки), обладающую более высоким быстродействием. В основе новой методики лежат следующие этапы:

1. Выделение из экспериментального контраста фоновой неоднородности;
2. Вычитание ее из исходного контраста, т.е. построение разностного контраста;
3. Гаусс-размытие разностного контраста, полученного на втором этапе;
4. Построение разностного контраста между изображениями, полученными на втором и третьем этапах;
5. Коррекция динамического диапазона.

В работе использованы простейшие (базовые) схемы вейвлет-преобразования и набор вейвлет-базисов, входящий в программный мате-

матический пакет «Matlab».

2. Применение на практике методик количественной оценки качества экспериментальных топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов позволяет существенно снизить субъективный фактор, основанный на визуальном восприятии анализируемого контраста, и в большей степени избежать ошибок при расшифровке экспериментального контраста и идентификации дефектов, их локализации в объеме монокристалла.

3. Методика оценки качества SSIM (по структурной схожести изображений) является более перспективной для количественной оценки топографического и поляризационно-оптического контрастов по сравнению с MSE и PSNR (соответственно, вычисление среднеквадратичного отклонения и пикового отношения сигнала к шуму). Причиной тому служит особенность самой метрики SSIM, при расчете которой учитываются яркостные, контрастные и структурные особенности сравниваемых изображений.

4. Наиболее простой, эффективной и экспрессной является методика количественной оценки качества топографических, поляризационно-оптических и оптических изображений, основанная на построении разностного контраста, яркостных характеристик и профилей интенсивности. Вся необходимая информация об анализируемых изображениях в течение 20–30 секунд получается в специализированной для обработки сложных сигналов программе «Image-Pro Plus 6.0». Методика апробирована при сравнении большого количества разнообразных топографических, поляризационно-оптических и оптических изображений и показала высокую эффективность и перспективность.

5. Анализ полученных при вейвлет-обработке результатов с применением количественных критериев оценки свидетельствует о том, что:

- вейвлет-обработка экспериментального контраста не вносит визуально видимых его искажений, влияющих на надежность идентификации дефектов структуры;

– при цифровой обработке топографических и поляризационно-оптических изображений наилучший результат по сравнению с другими, входящими в математический программный пакет «Matlab», получается при использовании вейвлет-базиса Симлета (**sym 8**).

6. Предложены и апробированы на большом количестве образцов экспресс-методики регистрации цветовых характеристик и их изменений при различных внешних воздействиях и хранении мясного сырья, колбасных изделий, воды, пива и вина. Качественная и количественная информация об изменениях цветовых характеристик надёжно фиксируется по разностному контрасту, областям равного контраста, профилям интенсивности и яркостным характеристикам.

6. Мясное сырьё (говядина, свинина) разных производителей, отличающееся друг от друга по органолептическим характеристикам и показателям свежести, отличается по цвету, что трудно регистрируется визуально, но легко при оцифровке и последующей цифровой обработке изображений мяса.

7. При хранении, заморозке и разморозке мясного сырья наблюдается изменение цвета мяса, не всегда регистрируемое визуально, но чётко фиксируемое по изменениям яркостных характеристик и разностному контрасту.

8. Хранение колбасных изделий разных производителей при различных условиях приводит к различной скорости изменения их цветовых характеристик, что практически не регистрируется визуально, но надёжно фиксируется по предложенной в работе методике.

9. Предложена модель визуализации процесса посола мяса цыпленка-бройлера многокомпонентной смесью соль-перец-чеснок (сухой и мокрый способы), определения скорости и глубины проникновения в мясо как смеси, так и отдельно каждой ее компоненты, получившая надёжное экспериментальное подтверждение с помощью четырех методик, основанных на регистрации изменений цветовых характеристик, оцифрованных изоб-

ражений, построении разностного контраста (нулевого и ненулевого), областей равного контраста, профилей интенсивности, яркостных характеристик и разложения анализируемого изображения по цветовым каналам. Наиболее полная информация получается при использовании синего и зелёного цветовых каналов.

10. Регистрация изменений цветовых характеристик может быть применена при экспресс-оценке качества речной, промышленной и питьевой воды. Методика основана в основном на построении разностного контраста и яркостных характеристик. Показана хорошая корреляция яркостных характеристик с основными показателями загрязнения воды, определенными по гостированным методикам на городской водоочистительной станции. Для питьевой, промышленной и речной воды на графике, представляющем собой зависимость изменения максимальных значений яркостных характеристик воды от интенсивности в градациях серого цвета (0–255), можно выделить области, соответствующие ГОСТ. Значения проб воды, не попавшие в эти области, свидетельствуют о несоответствии ее требованиям ГОСТ.

11. Регистрация без применения специальных красителей частиц различной физико-химической природы, содержащихся в пиве, изменения цвета пива и исследование процесса его старения, сравнительный анализ пива разных производителей достигается построением и анализом цветовых характеристик и их изменения при хранении и различных внешних воздействиях. Методика апробирована на пивоваренном заводе.

12. Выявление фальсифицированной винной продукции может быть реализовано ее оцифровкой, построением яркостных характеристик и разностного контраста, с последующим сравнением с эталонными образцами вина.

13. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения разработанных цифровых методик для экспресс-диагностики качества большого количества материалов и веществ, у которых под действием

различных внешних факторов имеет место изменение их цветовых характеристик.

14. Разработанные в данной работе цифровые методики экспресс-оценки качества веществ различной физико-химической природы и изменений, происходящих в них при воздействии различных внешних факторов, могут быть успешно применены в физическом материаловедении при диагностике структурного совершенства кристаллических материалов, на предприятиях пищевой промышленности при диагностике сырья, продукции, контроля и исследования технологического процесса, торговой инспекцией и Роспотребнадзором.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах.

Монографии:

1. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Яркостный и частотный анализ изображений дефектов структуры. LAP LAMBERT Academic Publishing Germany. 2012, 385 с. ISBN 978-3-8465-8855-0
2. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Компьютерная диагностика качества. LAP LAMBERT Academic Publishing Germany. 2012, 385 с. ISBN 978-3-359-22771-4

Статьи и расширенные тезисы докладов:

1. Ткаль В.А., Жуковская И.А. Цифровые методы повышения качества экспериментального контраста дефектов структуры монокристаллов.// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 4. С. 28–37.
2. Жуковская И.А., Шараева А.В., Иванова Т.Д., Мягкова Ю.А. Ткаль В.А., Экспресс-диагностика оценки качества и выявление фальсифицированной продукции.// Заводская лаборатория. Диагностика материалов (принято в печать в 2014 году).

3. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Количественная оценка оптимальности выбора вейвлет-функции при цифровой обработке изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Пятого международного научного семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, с. 175–178.
4. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Методики оценки качества реставрации изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Пятого международного научного семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, с. 179–181.
5. Ткаль В.А., Данильчук Л.Н., Петров М.Н., Жуковская И.А. Количественная оценка и сравнительный анализ эффективности методик цифровой обработки изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Пятого международного научного семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, с. 182–185.
6. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Сравнение эффективности различных методик цифровой обработки изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 116–124.
7. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Компьютерная экспресс-диагностика, основанная на регистрации изменений цветовых характеристик веществ различной физико-химической природы. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных

(дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 125–128.

8. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Экспресс-диагностика воды, основанная на регистрации изменений цветовых характеристик. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 129–133.

9. Tkal V.A., Okunev A.O., Zhukovskaya I.A. Identification of close located structure defects in single crystals by digital processing methods. Book of abstracts. XTOP 2012. 11th Biennial on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging and Youth International School-Conference «Modern Methods of Diffraction Data Analysis and Topical Problem of X-Ray Optics» -15th-20th September, St. Petersburg, Russia, p 188.

10. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Цифровые методы повышения качества топографических изображений. Сборник тезисов докладов научной конференции 27–28 ноября 2012 года «ЛАНУЭ- 100. Рентгеноструктурные исследования», Нижний Новгород, с. 98-100.

11. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А., Водолазова Н.Н. Цифровая экспресс-диагностика качества веществ различной физико-химической природы. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 124–127.

12. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А., Водолазова Н.Н. Цифровая экспресс-диагностика качества воды, используемой в различных производствах. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 128–130.

13. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Цифровая обработка поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 131–133.
14. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Количественная оценка эффективности цифровой обработки HDR-изображений. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 134–135.
15. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Цифровая обработка топографических изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Шестого международного научного семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 234–235.
16. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Количественные критерии оценки эффективности цифровой обработки изображений: теория и эксперимент. Сборник материалов Шестого международного научного семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 236–242.
17. Alexey Okunev, Galina A. Verozubova, Chunhui Yang, Chongqiang Zhu, Valery Tkal, Vladimir Staschenko, Inga A. Zhukovskaya. The Analysis of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals from Birefringence Images. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 158-160.
18. Valery Tkal, Alexey Okunev, Anna V. Sharaeva, Inga A. Zhukovskaya. Quantitative Criteria of Image Quality Evaluation, Theory and Experiment.

Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 167-168.

19. Valery Tkal, Alexey Okunev, Anna V. Sharaeva, Inga A. Zhukovskaya. Computer Diagnostics of Crystal Quality. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 168-169.

20. Alexey Okunev, Galina A. Verozubova, Chunhui Yang, Chongqiang Zhu, Valery Tkal, Inga A. Zhukovskaya, Vladimir Staschenko. Investigation of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals by X-ray Topography on Base of Bormann Effect. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 207-209.

21. A.O. Okunev, G.A. Verozubova, V.A. Tkal, V.A. Staschenko, I.A. Zhukovskaya. Imaging of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals by X-ray Topography on Base of Bormann Effect. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 90.

22. V.A. Tkal, A.O. Okunev, A.V. Sharaeva, I.A. Zhukovskaya. Features of Digital Processing of Topography Contrast in Single Crystal Materials. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 93.

23. V.A. Tkal, A.O. Okunev, A.V. Sharaeva, I.A. Zhukovskaya. Quantitative Criteria for Quality Evaluation of Single Crystal Topography Images. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 94.

24. Окунев А.О., Верозубова Г.А., Ткаль В.А., Стащенко В.А., Жуковская И.А. Анализ дефектов структуры монокристаллов ZnGeP₂ методами рентгеновской топографии и фотоупругости. Международный симпозиум

«ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской. Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 173

25. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Количественные критерии оценки качества топографических изображений дефектов структуры монокристаллов. Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской. Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 231.

26. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Повышение быстродействия вейвлет-обработки экспериментального контраста монокристаллов. Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской. Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 232.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульпина И.Л. Рентгеновская дифракционная топография. Этапы и тенденции развития // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед. 2000. № 4. С. 3-18.
2. Суворов Э.В., Шульпина И.Л. Рентгеновская оптика кристаллов с дефектами // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед. 2001. № 7. С. 3-22.
3. Ланг А.Р. Дифракционные и микроскопические методы в материаловедении. М: Металлургия, 1984.
4. Боуэн Д.К., Таннер Б.К. Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография / Пер. с англ. И.Л. Шульпиной и др. СПб.: Наука, 2002. 274 с.
5. Бюрен В. Дефекты в кристаллах. М.: Иностран. литер., 1962. 584 с.
6. Инденбом В.Л., Никитенко В.Н., Миусков В.Ф. Напряжения и дислокации в полупроводниках. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
7. Гатос Х., Финн М., Лавин М./ Несовершенства в кристаллах полупроводников. М.: Металлургия, 1964. 432 с.
8. Несовершенства в кристаллах полупроводников: Сб. ст. / Под ред. Д.А. Петрова. М.: Металлургия, 1964. 302 с.
9. Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. 626 с.
10. Дефекты в кристаллах полупроводников / Под ред. С.Н. Горина. М.: Мир, 1969. 312 с.
11. Хорнстра Дж. Дислокации в решетке алмаза // Дефекты в кристаллах полупроводников. М.: Мир, 1969. С. 15-37.
12. Хольт Д. Б. Дислокации несоответствия в полупроводниках // Дефекты в кристаллах полупроводников. М.: Мир, 1969. С. 140-163.
13. Освенский В. Б., Шифрин С.С., Мильвидский М.Г. // Дефекты структуры в полупроводниках. Новосибирск: Изд-во ИФП СО АН СССР, 1973. 212 с.

14. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М.: Металлургия, 1984. 256 с.
15. Kato N. // *J. Phys. Soc. Japan*. 1963. Vol. 18, N 6. P. 1785; 1963. Vol. 19, N 1. P. 67; 1964. Vol. 19, N 6. P. 971.
16. Инденбом В.Л., Чуховский Ф.Н. // *Кристаллография*. 1971. Т. 16, №6. с. 1101.
17. Инденбом В.Л., Чуховский Ф.Н. // *УФН*. 1972. Т. 107, №2. С. 229.
18. Takagi S. // *Acta Cryst*. 1962. Vol. 15. P. 1311.
19. Authier A., Slimon D. // *Acta Cryst*. 1968. Vol. A24. P. 517.
20. Authier A., Malgrange C., Tournarie M. // *Acta Cryst*. 1968. Vol. A24. P. 126.
21. Слободецкий И.Ш., Чуховский Ф.Н., Инденбом В.Л. // *Письма в ЖЭТФ*. 1968. Т. 8, № 2. С. 90.
22. Слободецкий И.Ш., Чуховский Ф.Н. // *Кристаллография*. 1970. Т. 15, №6. С. 1101.
23. Lang A.R. // *Acta met*. 1957. № 5. P. 358.
24. Lang A.R. // *J. App. Phys*. 1958. № 29. P. 597.
25. Lang A.R. // *Acta Cryst*. 1959. № 12. P. 249.
26. Borrmann G. Über Exinktion der Röntgenstrahlen von Quarz // *Physik Zeit.* – 1941. – Bd. 42, № 9/10. – S. 157–162.
27. Borrmann G. Die Absorption von Röntgenstrahlen im Fall der Interferenz // *Physik Zeit.* – 1950. – Bd. 127, № 4. – S. 297–323.
28. Иверонова В.И., Ревкевич Г.П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. М.: Изд-во МГУ, 1978. 277 с.
29. Пинскер З.Г. Рентгеновская кристаллооптика. М.: Наука. 1982. 392 с.
30. Hirsch P. B. The reflexion and transmission of X-rays in perfect absorbing crystals // *Acta Cryst*. 1952. Vol. 5, N 3. P. 176-181.
31. Laue M. Die Energiesströmung bei Röntgenstrahl - Interferenzen im Kristallen // *Acta Cryst*. 1952. Bd. 5, N 8. S. 619-625.
32. Zachariasen W.H. On the anomalous transparency of thick crystals to X-

rays // Proc. N.A.S. USA. 1952. Vol. 38, N 4. P. 378-382.

33. Authier A. Contrast of dislocation images in X-ray transmission topography//Adv. in X-ray Analysis. 1967. Vol. 10, N 1. P. 9-31.

34. Barth H., Hosemann R. Use of parallel beam transmission method for the X-ray examination of crystal structure. // Zeit. Naturforsch. – 1958. – V. 13 A, № 4. – P. 792.

35. Gerold V., Meier F. / Der Röntgenographische Nachweis von Versetzungen in Germanium. Zeit. Physik. 1959. Bd. 155. № 4. S. 387-394.

36. Данильчук Л.Н., Окунев А.О., Ткаль В.А. Рентгеновская дифракционная топография дефектов в кристаллах на основе эффекта Бормана / НовГУ им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород, 2006. 493 с.

37. Данильчук Л.Н. Бормановская рентгеновская топография дефектов в кристаллах с медленно изменяющимися полями деформации: Дис... д-ра. физ.-мат. наук. Киев, 1992. 361 с.

38. Окунев А.О. Рентгенотопографический анализ дефектов структуры монокристаллического карбида кремния: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новгород, 1999. 263 с.

39. Цифровая обработка рентгенотопографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов / Л.Н. Данильчук, В.А. Ткаль, А.О. Окунев, Ю.А. Дроздов; НовГУ им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород, 2004. 227 с.

40. Вейвлет-анализ топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов: Монография / В.А. Ткаль, А.О. Окунев, Г.М. Емельянов, М.Н. Петров, Л.Н. Данильчук; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2006. 397 с.

41. Рентгеновская топография кремния на основе плёночной интерферометрии эпитаксиальных систем и эффекта Бормана / Л.Н. Данильчук, А.О. Окунев, В.А. Ткаль и др.; НовГУ им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород, 2006. 351 с.

42. Ткаль В.А., А.О. Окунев, И.А. Жуковская. Яркий и частотный

анализ изображений дефектов структуры. LAP LAMBERT Academic Publishing. Germany, 2012. 386 с.

43. Данильчук Л.Н., Окунев А.О., Ткаль В.А. Рентгеновская топография на основе эффекта Бормана. LAP LAMBERT Academic Publishing. Germany, 2012. 341 с.

44. Шульпина И.Л. Рентгеновская дифракционная плосковолновая топография // Заводская лаб. Диагностика материалов. 1999. Т. 66, № 2. С. 25-37.

45. Инбенбом В.Л., Томиловский Г.Е. / Макроскопические краевые дислокации в кристалле корунда // Кристаллография. 1957. Т. 2, № 1. С. 190-194.

46. Окунев А.О. Анализ дефектов структуры полупроводников по рентгенотопографическим и поляризационно-оптическим розеткам контраста: Дис... д-ра. физ.-мат. наук. Ижевск, 2009. 350 с.

47. Данильчук Л.Н., Никитенко В. И. Прямые наблюдения винтовых дислокаций, перпендикулярных поверхности монокристалла кремния // ФТТ. 1967. Т. 9, № 7. С. 2027-2034.

48. Золотов Д.А. Абсорбционная микротомография и топо-томография слабопоглощающих кристаллов с использованием лабораторных рентгеновских источников: Дис. ... канд. ф.-м. наук./ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, 2011. 132 с.

49. Бузмаков А.В. Рентгеновская микротомография с использованием увеличивающих рентгенооптических элементов: Дис. ... канд. ф.-м. наук./ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2009. 131 с.

50. Картужанский А.Л., Красный-Адмони Л.В. Химия и физика фотографических процессов. Изд. 2-е. Л., 1987. 137с.

51. Penning P., Polder D. // Philips Res. Rep. 1961. V. 16, № 2. P. 419.

52. Katagawa T., Kato N. // Acta Cryst. 1974. V. A30, № 6. P. 830.

53. Chukhovskii F. N., Petrashen P. V. // Acta Cryst. 1977. V. A33, №2. P. 311.

54. Kato N., Patel J. R. // *Appl. Phys.* 1973. V. 14, № 3. P. 965.
55. Takagi S. Dynamical theory of diffraction applicable to crystals with any kind of small distortion // *Acta Cryst.* 1962. V. 15, № 10. P. 1311-1312.
56. Taupin D. Prevision de quelques Images de Dislocations par Transmission des Rayons X (Cas de Laue symetrique) // *Acta Cryst.* 1967. V. 23, № 1. P. 25-35.
57. Balibar F., Authier A. Etude theorique et experimentale du contraste des images de dislocations // *Phys. stat. sol.* 1967. V. 21, № 2. P. 413-422.
58. Sauvage M., Malgrange S. Observation of X-ray stacking fault fringes in the plane wave case // *Phys. stat. sol.* 1970. V. 37, № 3. P. 759-771.
59. Takagi S. // *Phys. Soc. Japan.* 1969. V. 26, № 5. P. 1239.
60. Taupin D. // *Bull. Soc. Franc. Miner. Crist.* 1964. V. 87. P. 469.
61. Chukhovskii F.N., Stolberg A.A. On the dynamical theory of X-ray images of real crystal // *Phys. stat. sol.* 1970. V. 41, № 3. P. 815-825.
62. Инденбом В.Л., Чуховский Ф.Н. Проблема изображения в рентгеновской оптике // *Укр. физ. журн.* 1972. Т. 107, № 6. С. 229-265.
63. Тихонова Е.А. Теория бормановского дислокационного контраста // *Укр. физ. журн.* 1976. Т. 21. С. 709-734.
64. Dislocation contrast in the case of anomalous X-ray transmission / Suvorov E.V., Jndenbom V.L. и др. // *Phys. stat. sol.(a).* 1980. V. 60, № 1. P. 27-35.
65. Ткаль В.А., Дзюба И.В., Данильчук Л.Н. Моделирование Теоретического контраста дефектов структуры различного типа с «зашумляющими факторами». Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 10. С. 59–65.
66. Дзюба И.В. Моделирование изображений дефектов структуры монокристаллов в рентгеновской топографии на основе эффекта Бормана: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. / Удмуртский государственный университет, Ижевск, 2011. 228 с.
67. Borrmann G., Hartwig W., Jrmmler H. / Schatten von Versetzungslinien im Röntgen-Diagramm // *Zeit Naturforsch.* 1958. Bd. 13A, № 5. S. 423-425.

68. Шульпина И.Л. Применение АПРЛ для обнаружения и исследования дефектов в достаточно совершенных кристаллах // Рост кристаллов. М., 1965. Т. 5. С. 285-299.
69. Authier A. Observation des dislocations dans le silicium a l'aide des rayons X dans le cas la transmission anormale // J. Phys. Radium. 1960. V. 21, № 8/9. P. 655-661.
70. Данильчук Л.Н., Смородина Т.А. Наблюдение полей напряжений вокруг отдельных дислокаций методом АПРЛ // ФТТ. 1965. Т. 7, № 4. С. 1245-1247.
71. Данильчук Л.Н. Рентгеновское наблюдение полей деформаций вокруг краевых дислокаций в монокристаллах германия // ФТТ. 1969. Т. 11. С. 3085-3091.
72. Данильчук Л.Н., Анисимов В.Г. Природа гигантских дефектов упаковки в монокристаллах кремния // Карбид кремния и родственные материалы: Сб. докл. III Междунар. семинара. Великий Новгород, 2000. С. 63-74.
73. Shaibani S.J., Hazzledine P.M. The displacement and stress fields of a general dislocation close to a free surface of an isotropic solid // Phil. Mag.(A). 1981. V. 44, №3. P. 657-665.
74. Суворов Э.В., Мухин К.Ю. Секционное изображение дефекта упаковки // Материалы IV совещ. по динамическим эффектам рассеяния рентгеновских лучей и электронов. Л., 1977. С. 42-45.
75. Георгиев А.И., Данильчук Л.Н. Изучение дефектов упаковки в эпитаксиальных слоях германия // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. материалы. 1968. Т. 4, № 10. С. 1627-1632.
76. Георгиев А.И., Данильчук Л.Н., Смородина Т.А. Сопоставление метода АПРЛ и химического травления поверхности германия при изучении дефектов упаковки // Вопр. радиофизики и спектроскопии. М., 1966. Вып. 2. С. 306-310.
77. Инденбом В.Л., Чуховский Ф.Н. Рентгеновское изображение дефекта

- упаковки, перпендикулярного поверхности кристалла // Кристаллография. 1974. Т. 19, № 1. С. 35-41.
78. Швутке Г., Силсе В. Рентгеновский анализ структур дефектов упаковки в эпитаксиальном наращенном кремнии // Прямые методы исследования дефектов в кристаллах. М., 1965. С. 246-258.
79. Выявление и исследование микродефектов в кремнии методами рентгеновской топографии / Н.О. Крылова, В. Мелинг, И.Л. Шульпина, Э.Г. Шейхет // ФТТ. 1986. Т. 28, № 2. С. 440-446.
80. Каганер В.М., Инденбом В.Л. Рентгенотопографические изображения микродефектов при дифракции по Бреггу // Кристаллография. 1987. Т. 32, № 2. С. 297-304.
81. Indenbom V.L., Kaganer V.M. The formation of X-ray images of microdefects // Phys. stat. sol. (a). 1985. V. 87, № 1. P. 253-265.
82. Данильчук Л.Н. Ростовые включения второй фазы в кремнии, выращенном по методу Чохральского // 6 междунар. конф. по росту кристаллов: Тез. докл. М., 1980. Т. 4. С. 294-296.
83. Данильчук Л.Н. Бормановский контраст интенсивности от когерентных включений второй фазы в монокристаллах полупроводников // Тез. Второго совещ. по Всесоюз. межвузовской комплексной прогр. «Рентген». Ереван, 1987. С. 40-41.
84. Данильчук Л.Н. Бормановский контраст интенсивности от когерентных квазиточечных дефектов в кремнии // Вторая конф. по динамическому рассеянию рентгеновских лучей в кристаллах с динамическими и статическими искажениями: Тез. докл. Киев, 1991. С. 119-127.
85. Шульпина И.Л., Даценко Л.И. Об изображении линейных дефектов в методе АПРЛ // Укр. физ. журн. 1967. Т. 12, № 9. С. 1474-1482.
86. Данильчук Л.Н. Исследование дислокационной структуры монокристаллов и пленок с решеткой типа алмаза методом аномального прохождения рентгеновских лучей: Дис... канд. физ.-мат. наук. Новгород, 1967. 177 с.

87. Даценко Л.И., Молодкин В.Б., Осинковский М.Е. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей реальными кристаллами. Киев, 1988. 196 с.
88. Ефимов О.Н. Влияние различного типа нарушений периодичности на аномальное прохождение рентгеновских лучей в монокристаллах германия: Дис... канд. физ.-мат. наук. Л., 1964.
89. Данильчук Л.Н. Формирование контраста интенсивности под действием температурных деформаций в случае эффекта Бормана в германии // Материалы IV совещ. по динамическим эффектам рассеяния рентгеновских лучей и электронов. Л., 1977. С. 65-81.
90. Смородина Т.А., Данильчук Л.Н. Использование метода АПРЛ для изучения структуры монокристаллического германия при эпитаксиальном наращивании германиевых слоев // Ученые зап. Петрозавод. гос. ун-та им О.В. Кусинена. Петрозаводск, 1968. Т.16, вып.6. С. 65-73.
91. Данильчук Л.Н., Смородина Т.А. Смещение изображения дислокаций при аномальном прохождении рентгеновских лучей // Рост кристаллов. М, 1965. Т. 5. С. 321-326.
92. Дроздов Ю.А. Компьютерная обработка рентгенотопографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов: Дис. ...канд. техн. наук / НовГУ им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, 2003. 233 с.
93. Исследование дислокаций в монокристаллическом карбиде кремния поляризационно-оптическим методом / Ю.А. Дроздов, А.О. Окунев, В.А. Ткаль, И.Л. Шульпина //Заводская лаб. Диагностика материалов. 2003. Т 69, № 1. С. 24-29.
94. Диагностика монокристаллов с применением компьютерной обработки дифракционных и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры / Л.Н. Данильчук, Ю.А. Дроздов, А.О. Окунев и др. // Заводская лаб. Диагностика материалов. 2003. № 11. С. 26-32.
95. Диагностика монокристаллов с применением компьютерной обработки дифракционных и поляризационно-оптических изображений дефектов

структуры / Л.Н. Данильчук, Ю.А. Дроздов, А.О. Окунев и др. // Современные методы анализа дифракционных данных (рентгенотопография, дифрактометрия, электронная микроскопия): Тез. докл. Междунар. науч. семинара. Великий Новгород, 2002. С. 47-49.

96. Устранение фоновой неоднородности и влияния зернистости фотоматериалов на топографические и поляризационно-оптические изображения дефектов структуры монокристаллов / Ю.А. Дроздов, В.А. Ткаль, А.О. Окунев, Л.Н. Данильчук // Заводская лаб. Диагностика материалов. 2004. № 7. С. 25-34.

97. Окунев А.О., Ткаль В.А., Дроздов Ю.А., Данильчук Л.Н. Методы цифровой обработки рентгенотопографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов // 2-га Українська наукова конференція з фізики напівпровідників. Матеріали конференції. – Чернівці: Рута, 2004. – Т. 1. – С. 177–178.

98. Окунев А.О., Данильчук Л.Н., Ткаль В.А., Дроздов Ю.А.. Исследование дефектов структуры в полупроводниках по рентгеновским и оптическим розеткам контраста // 2-га Українська наукова конференція з фізики напівпровідників. Матеріали конференції. – Чернівці: Рута, 2004. – Т. 2. –

99. С. 403–404.

100. Дроздов Ю.А., Ткаль В.А., Окунев А.О., Данильчук Л.Н. Цифровая обработка топографических и оптических изображений дефектов структуры монокристаллического 6H-SiC // Сборник материалов 5-го международного семинара «Карбид кремния и родственные материалы». – Великий Новгород, 2005. – С. 39–40.

101. Анисимов В.Г. Исследование ростовых дефектов упаковки монокристаллического кремния рентгенотопографическим методом на основе эффекта Бормана: Дисс. ... канд. физ-мат. наук. – В. Новгород: НовГУ, 2004. – 212 с.

102. Дроздов Ю.А. Компьютерная обработка рентгенотопографических изображений дефектов структуры полупроводников // Восьмая Всероссий-

ская научная конференция студентов физиков и молодых учёных: Тезисы докладов. – Екатеринбург, 2002. – С. 179.

103. Белехов Я.С. Оптоэлектронная диагностика структуры монокристаллических полупроводников с применением вейвлет-анализа: Дис. ...канд. техн. наук. Москва, ФГУП «НИИ ПП», 2007. – 302 с.

104. Ткаль В.А. Цифровые методы обработки рентгенотопографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллических полупроводников: Дис. ... д-ра ф.-м. наук. / Удмуртский государственный университет, Ижевск, 2007. 495 с.

105. Lang A.R. X-ray detectors / Characterisation of crystal growth defects by X-ray methods. NATO advanced study institutes series. Ser. B-Physics. New York: Plenum Press, 1980. Vol. 63. P. 320-332.

106. Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А. Компьютерная обработка рентгенотопографических изображений дефектов структуры монокристаллов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед. 2002. № 8. С. 6-11.

107. Применение компьютерной обработки рентгенотопографических изображений для идентификации дефектов структуры монокристаллов / Ю.А. Дроздов, А.О. Окунев, В.А. Ткаль, И.Л. Шульпина // Заводская лаб. Диагностика материалов. 2002. Т. 68, № 12. С. 30-36.

108. Компьютерная обработка и анализ топографических изображений краевых дислокаций в монокристаллах 6H-SiC/ В.А. Ткаль, А.О. Окунев, Ю.А. Дроздов и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед. 2004. № 1. С. 32-38.

109. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. М., 2001. 784 с.

110. Претт У. К. Цифровая обработка изображений. М., 1982. 790 с.

111. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М., 1970. 364 с.

112. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Под ред. Т.С. Хуанга. М., 1979. 318 с.

113. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Под ред. Т.С. Хуанга. М., 1984.
114. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений.
115. М., 1979.
116. Эндрюс Г. Применение вычислительных машин для обработки изображений. М., 1977.
117. Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин / Под ред. Г. Эндрюса, Л. Инло. М., 1973.
118. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин. М., 1972.
119. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М., 1986.
120. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. М., 1989.
121. Ярославский Л.П. Устройства ввода-вывода изображений для цифровых вычислительных машин. М., 1968.
122. Ткаль В.А., Жуковская И.А. Цифровые методы повышения качества экспериментального контраста дефектов структуры монокристаллов. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. №4. – с. 28–37.
123. Рудаков П.И., Сафонов В.И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x. – М.: Диалог – МИФИ, 2000. – 416 с.
124. Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А. Компьютерная обработка рентгенотопографических изображений дефектов структуры монокристаллов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2002, № 8. – с. 6-11.
125. Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А. Компьютерная обработка рентгенотопографических изображений дефектов структуры монокристаллов // III национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов РСНЭ-2001: Тезисы докладов. – Москва, 2001. – С. 329.
126. Дьяконов В.П. Maple 7. Учебный курс. – С. Пб.: Питер. 2001.

127. Трахтман А.М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. – М.: Сов. радио. 1972. – 351 с.
128. Залманзон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара. – М.: Наука. 1989. – 496 с.
129. Goswami J.C., Chan A.K. Fundamentals of Wavelets: theory, algorithms and applications / A Wiley-Interscience public, 2000. – 308 p.
130. Дьяконов В.П. От теории к практике. Вейвлеты. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
131. Луций С., Петров М. Corel PHOTO-PAINT 9. Руководство пользователя с примерами и упражнениями. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 448 с.
132. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер. 2002.
133. Дьяконов В.П. MATLAB 6. Учебный курс. – СПб.: Питер. 2001.
134. Дьяконов В.П. Компьютерная математика. Теория и практика. – М.: Нолидж. 2001.
135. Дьяконов В.П. MathCAD 2001. Специальный справочник. – СПб.: Питер. 2002.
136. Дьяконов В.П. MathCAD 2001. Учебный курс. – СПб.: Питер. 2001.
137. Дьяконов В.П. Mathematica 4. Учебный курс. – С.Пб.: Питер. 2001.
138. Vetterli M., Kovačević J. Wavelets and subband coding. – Prentice Hall PTR. New Jersey, USA. 1995. – 487 p. (<http://www.autex.spb.ru/>).
139. Теория и практика вейвлет-преобразования / Воробьев В.И., Грибунин В.Г. – СПб.: ВУС, 1999. – 208 с.
140. Чуи Ч. Введение в вейвлеты: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 412 с.
141. Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов. Учебное пособие. – СПб.: ООО «МОДУС+», 1999. – 152 с.
142. Смит С.В. Научно-техническое руководство по цифровой обработке сигналов / Пер. с англ. под ред. Покровского В.Н., Силантьева В.И. – СПб.: АВТЭКС. 2001. (<http://www.autex.spb.ru/>).

143. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
144. Strela V., Heller P., Strang G., Topiwala G., Neil C. The application of multiwavelet filter banks to image processing // IEEE Trans. Sig. Proc., 1996.
145. Вайдьянатхан П.П. Цифровые фильтры, блоки фильтров и полифазные цепи с многочастотной дискретизацией: Методический обзор // ТИИЭР, 1990, № 3. – С. 77–120.
146. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с
147. Mallat S.G. Multiresolution Approximations and Wavelet of orthonormal Bases of $L_2(\mathbb{R})$ // Transactions of the American Mathematical Society. 1989. – V. 315, № 1. – P. 69–87.
148. Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, – 1989, № 7. – P. 674–693.
149. Robi Polikar. Введение в вейвлет-преобразование / Пер. с англ. под ред. Грибунина В.Г. (электронная версия) – СПб.: АВТЭКС. 2002. (<http://www.autex.spb.ru/>).
150. Малоземов В.Н., Певный А.Б., Третьяков А.А. Быстрое вейвлетное преобразование дискретных периодических сигналов и изображений // Проблемы передачи информации. – 1998. – Т. 34, вып. 2. – С. 77–85.
151. Antonini M, Barlaud M, Mathieu P, Daubechies I. Image coding using Wavelet Transform // IEEE Trans. On Image Process. – 1992. – V. 1, № 2. – P. 205–220.
152. Wavelets and their Applications in Computer Graphics // Course Notes: #26 from Siggraph '95 Conference. – University of British Columbia. 1995. 238 p.
153. Rabbani M., Joshi R. An overview of the JPEG 2000 still image compression standard (and other JPEG2000 articles) // IEEE Signal Processing: Image Communication 17, 2002.

154. Mallat S., Falzon F. Understanding image transform codes // Proc. SPIE Aerospace Conf., Orlando, 1997.
155. Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н. Выявление особенностей экспериментального контраста при перемасштабировании изображений на основе вейвлет-анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 9. – С. 25–33.
156. Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н. Применение вейвлет-анализа для устранения фоновой неоднородности поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 7. – С. 22–29.
157. Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н. Устранение фоновой неоднородности изображений дефектов структуры монокристаллов различными вейвлетами / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 3. С. 28–37.
158. Ткаль В.А., Окунев А.О., Данильчук Л.Н., Петров М.Н., Андреев А.А. Применение вейвлет-анализа для устранения фоновой неоднородности поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов // Программа и материалы Третьего международного научного семинара «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия). – Великий Новгород. 2006. – С. 254 – 258.
159. Ткаль В.А., Окунев А.О., Петров М.Н., Данильчук Л.Н., Прашка М.М. Анализ влияния яркостного разрешения поляризационно-оптических и топографических изображений на эффективность вейвлет-обработки // Программа и материалы Третьего международного научного семинара «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия). – Великий Новгород. 2006. – С. 259–262.
160. Белехов Я. С. Петров М. Н. Сравнение эффективности Фурье – и

вейвлет-анализа при цифровой обработке топографического контраста краевых дислокаций в монокристаллах 6H-SiC // III Межвузовская научно-техническая конференция «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств»: Тезисы докладов. – Новополюцк, 2004. – С. 26–29.

161. Белехов Я. С., Дроздов Ю.А. Сопоставление Фурье - и вейвлет-анализа в цифровой обработке топографического контраста дефектов полупроводниковых структур // X Всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых учёных (ВНКСФ-10). МГУ: Тезисы докладов. – Москва. 2004. – С.1162–1164.

162. Ткаль В.А., Петров М.Н., Воронин Н.А. Вейвлет-обработка и устранение фоновой неоднородности поляризационно-оптического контраста дефектов структуры монокристаллов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 12. С. 24–32.

163. Ткаль В.А. Повышение быстродействия вейвлет-обработка при устранении фоновой неоднородности поляризационно-оптических и топографических изображений дефектов структуры монокристаллов: материалы совещания «Рентгеновская оптика – 2010». – Черногoловка: ИПТМ РАН, 2010. –С. 60–62.

164. Ткаль В.А., Петров М.Н., Воронин Н.А. Устранение фоновой неоднородности на изображениях дефектов структуры монокристаллов с использованием вейвлет-анализа. XIV Национальная конференция по росту кристаллов и IV Международная конференция «Кристаллофизика XXI века». Т.2 // Тезисы докл. 6 – 10 декабря 2010. – М.:ИК РАН – МИСиС, 2010. С. 327–328

165. Ткаль В.А., Петров М.Н., Воронин Н.А., Дзюба И.В. Устранение фоновой неоднородности экспериментального контраста дефектов структуры монокристаллов / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 1. С. 30–37.

166. Paul E. Debevec and Jitendra Malik. Recovering High Dynamic Range Ra-

diance Maps from Photographs, Proceedings of SIGGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 369–378 (August 1997, Los Angeles, California). Addison Wesley. Edited by Turner Whited. ISBN 0-89791-896-7.

167. Ткаль В.А. Моделирование основных зашумляющих факторов изображений и повышение надежности идентификации дефектов структуры монокристаллов. Тезисы докладов НКРК-2010 (Четырнадцатая Национальная конференция по росту кристаллов и IV Международная конференция «Кристаллофизика XXI века», том 1, Москва, 6-10 декабря 2010 года, с. 26–27.

168. Ткаль В.А. Количественный критерий оценки эффективности цифровой обработки изображений дефектов структуры монокристаллов. Материалы совещания «Рентгеновская оптика – 2010», Черноголовка, 20–23 сентября 2010 г., с. 37–39.

169. Ткаль В.А., Петров М.Н. Количественная оценка эффективности вейвлет-обработки изображений дефектов структуры монокристаллов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 5. С. 14–20.

170. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Количественная оценка оптимальности выбора вейвлет-функции при цифровой обработке изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Пятого международного научного семинара 12-16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, с. 175-178.

171. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Методики оценки качества реставрации изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Пятого международного научного семинара 12-16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, с. 179-181.

172. Ткаль В.А., Данильчук Л.Н., Петров М.Н., Жуковская И.А. Количественная оценка и сравнительный анализ эффективности методик цифровой обработки изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов и программа Пятого международного научного семинара «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия). – Великий Новгород. 2011. – с. 182–185.
173. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Сравнение эффективности различных методик цифровой обработки изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12-16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 116-124.
174. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Цифровая обработка поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 131–133.
175. Tkal V.A., Okunev A.O., Zhukovskaya I.A. Identification of close located structure defects in single crystals by digital processing methods. Book of abstracts. XTOP 2012.11th Biennial on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging and Youth International School-Conference «Modern Methods of Diffraction Data Analysis and Topical Problem of X-Ray Optics» -15th-20th September, St. Petersburg, Russia, 188 s.9.
176. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Цифровые методы повышения качества топографических изображений. Сборник тезисов докладов научной конференции 27-28 ноября 2012 года «ЛЯУЭ- 100. Рентгеноструктурные исследования», Нижний Новгород, с. 98-100.
177. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Количественная оценка

эффективности цифровой обработки HDR-изображений. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 134–135.

178. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Количественные критерии оценки эффективности цифровой обработки изображений: теория и эксперимент. Сборник материалов Шестого международного научного семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 236–242.

179. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Цифровая обработка топографических изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Шестого международного научного семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 234–235.

180. Alexey Okunev, Galina A. Verozubova, Chunhui Yang, Chongqiang Zhu, Valery Tkal, Vladimir Staschenko, Inga A. Zhukovskaya. The Analysis of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals from Birefringence Images. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 158-160.

181. Valery Tkal, Alexey Okunev, Anna V. Sharaeva, Inga A. Zhukovskaya. Quantitative Criteria of Image Quality Evaluation, Theory and Experiment. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 167-168.

182. Valery Tkal, Alexey Okunev, Anna V. Sharaeva, Inga A. Zhukovskaya. Computer Diagnostics of Crystal Quality. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 168-169.

183. Alexey Okunev, Galina A. Verozubova, Chunhui Yang, Chongqiang Zhu,

Valery Tkal, Inga A. Zhukovskaya, Vladimir Staschenko. Investigation of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals by X-ray Topography on Base of Bormann Effect. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epi-taxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 207-209.

184. A.O. Okunev, G.A. Verozubova, V.A. Tkal, V.A. Staschenko, I.A. Zhukovskaya. Imaging of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals by X-ray Topography on Base of Bormann Effect. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 90.

185. V.A. Tkal, A.O. Okunev, A.V. Sharaeva, I.A. Zhukovskaya Features of Digital Processing of Topography Contrast in Single Crystal Materials. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 93.

186. V.A. Tkal, A.O. Okunev, A.V. Sharaeva, I.A. Zhukovskaya. Quantitative Criteria for Quality Evaluation of Single Crystal Topography Images. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 94.

187. Окунев А.О., Верозубова Г.А., Ткаль В.А., Стащенко В.А., Жуковская И.А. Анализ дефектов структуры монокристаллов ZnGeP₂ методами рентгеновской топографии и фотоупругости. Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской. Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 173

188. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Количественные критерии оценки качества топографических изображений дефектов структуры монокристаллов. Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской.

Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 231.

189. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Повышение быстродействия вейвлет-обработки экспериментального контраста монокристаллов. Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской. Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 232.

190. Ahumada A.J. Jr. Computational image quality metrics: A review. In SID Symposium Digest, 1993. P.305–308.

191. Avcibas I., Sankur B., and Sayood K. Statistical evaluation of image quality measures. J. Electronic Imaging, 2002. P.206–223.

192. Wang Z., Bovik A., Sheikh H., Simoncelli E. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. IEEE Trans. On Image Proc., 2004. Vol.13, № 4.

193. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Под ред. Хуанга Т.С., – М.: Мир, 1979. – 318 с.

194. Петров М.Н. Эффективная работа: PhotoShop CS (+CD). – СПб.: Питер, 2004. – 845 с.

195. Петров М.Н. PhotoShop CS2. Для профессионалов (+CD). – СПб.: Питер, 2006. – 731 с.

196. Методы компьютерной обработки изображений. / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2001. – 784 с.

197. Ткаль В.А., Окунев А.О., Глущенко Л.Ф., Шараева А.В. Контроль качества мясного сырья по цветовым характеристикам. // «Мясная индустрия» . – 2007. № 6. – С. 61–64.

198. Шараева А.В. Цифровые методы экспресс-диагностики качества пищевых продуктов и визуализации процесса посола: Дис. ... канд. техн. наук. / Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, Санкт-Петербург, 2008. 279 с.

199. Ткаль В.А., Окунев А.О., Шараева А.В. Цифровые методы экспресс-диагностики качества пищевых продуктов и визуализации процесса посола

мяса. – Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2008. – 316 с.

200. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Компьютерная диагностика качества. LAP LAMBERT Academic Publishing Germany. 2012, 346 с.

201. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Компьютерная экспресс-диагностика, основанная на регистрации изменений цветовых характеристик веществ различной физико-химической природы. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 125–128.

202. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А., Водолазова Н.Н. Цифровая экспресс-диагностика качества веществ различной физико-химической природы. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 124–127.

203. Ткаль В.А., Окунев А.О., Шараева А.В. Применение компьютерных технологий для исследования изменений цвета колбасных изделий // «Мясная индустрия». – 2007. № 9. – С. 34–37.

204. Ткаль В.А., Окунев А.О., Шараева А.В. Экспресс-диагностика, основанная на регистрации цветовых характеристик исследуемого вещества // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 11. – С. 32–37.

205. Технология полуфабрикатов из мяса птицы / В.В. Гушин, Б.В. Кулишов, И.И. Маковеев, Н.С. Митрофанов. – М.: Колос, 2002. – 200 с.

206. Цифровые методы визуализации процесса посола мяса / В.А. Ткаль, А.О. Окунев, Л.Ф. Глущенко, А.В. Шараева // «Хранение и переработка сельхозсырья». – 2005. № 10. С. 19–24.

207. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Компьютерная экспресс-диагностика, основанная на регистрации изменений цветовых характери-

стик веществ различной физико-химической природы. Сборник материалов и программа Третьей международной молодежной научной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нано технологии). – Великий Новгород. 2011. – С. 125–128.

208. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. – М.: Радио и связь, 1986.

209. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. – М.: Мир, 1989.

210. Яншин В., Калинин Г. Обработка изображений на языке С для IBM PC. – М.: Мир. 1994.

211. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.

212. Морей Д., Ван Райпер У. Энциклопедия форматов графических файлов. Киев: BHV, 1997.

213. Ермолаева Г.А., Колчева Р.А. Технология и оборудование производства пива и безалкогольных напитков. – М.: ИРПО; Изд. центр «Академия», 2000. – 416 с.

214. Веселов И.Я. Технология пива. – М.: Колос, 1995. 365 с.

215. Германова Л.М. Экспертиза качества пива. Методическое руководство МВШЭ. МР – 017 – 2003 – М.: Автономная некоммерческая организация «Московская высшая школа экспертизы», 2003 г. – 120 с.

216. Ермолаева Г.А. Современный химико-технологический контроль в пивоварении // Пиво и напитки. – 2003. №1. – С. 36–37.

217. Андреева О.В. Шувалова Е.Г. Атлас «Осадки в пиве». – Москва, ООО «МИЦ Пиво и напитки XXI век», 2004. – 180 с.

218. Царьков Д.А., Карпенко Д.В., Казьмина Е.В. Повышение коллоидной стойкости пива // Пиво и напитки. – 2006. №5. – С. 26–27.

219. Иванова Е.Г., Киселева Л.В., Ленец Н.Г. Антиоксиданты для улучшения вкуса и стабильности пива // Пиво и напитки. – 2004. № 2. – С. 25.

220. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Экспресс-диагностика воды, основанная на регистрации изменений цветовых характеристик. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12-16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 129-133.
221. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А., Водолазова Н.Н. Цифровая экспресс-диагностика качества воды, используемой в различных производствах. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 128–130.
222. СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы.
223. Чаплыгин А.В. Цветовая характеристика красных вин./ А.В. Чаплыгин, Н.М. Агеева, В.Я. Одарченко// Виноделие и виноградарство. - 2006. - №3. – 33 с.
224. Точилина Р.П. Контроль характеристики цветности красных вин как объективный показатель их качества.// Виноделие и виноградарство. - 2006. -№1. - с. 12-13.
225. Ли Э., Пигготт Дж. Спиртные напитки: особенности брожения и производства / Э. Ли, Дж. Пигготт (ред.); перевод с англ. под общ. ред. А. Л. Панасюка. - СПб.: Профессия, 2006. - 552с, ил. - /Серия: Научные основы и технологии/
226. ГОСТ 7208-93 Вина виноградные и виноматериалы виноградные обработанные. - М.: Издательство стандартов, 1994.-7с.

Работа выполнялась при поддержке Гранта РФФИ № 12-02-00201.